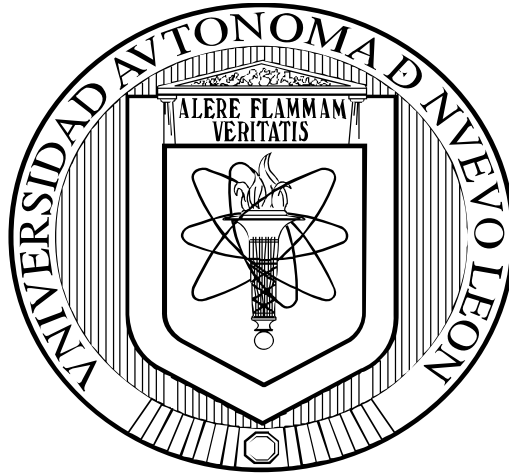


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE GENERADORES
EÓLICOS**

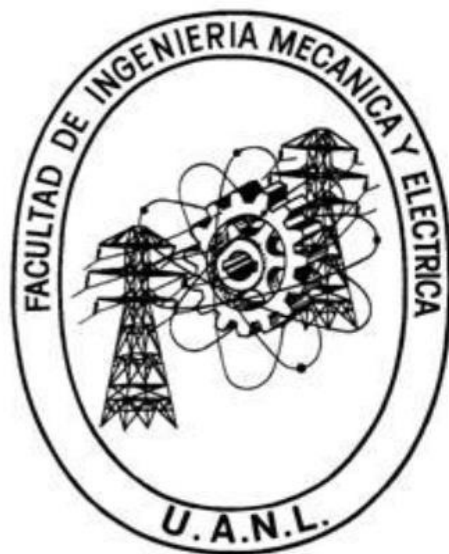
POR

ING. JUAN ANTONIO SÁNCHEZ FLORES

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA AERONÁUTICA CON ORIENTACIÓN EN
DINÁMICA DE VUELO**

NOVIEMBRE, 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DE GENERADORES
EÓLICOS**

POR

ING. JUAN ANTONIO SÁNCHEZ FLORES

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA AERONÁUTICA CON ORIENTACIÓN EN
DINÁMICA DE VUELO**

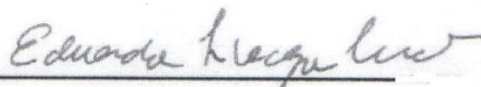
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,

NOVIEMBRE, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Diseño de un Banco de Pruebas para el Estudio de Generadores Eólicos " por el Ing. Juan Antonio Sánchez Flores con número de matrícula: 1360358 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ingeniería Aeronáutica con orientación en Dinámica de Vuelo.

El Comité de Tesis



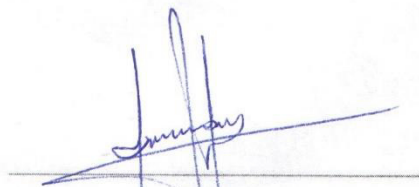
Dr. Eduardo Liceaga Castro

Asesor



MC. Daniel Librado Martínez Vázquez

Coasesor



Dr. Jesús Ulises Liceaga Castro

Coasesor

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de estudios de posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L.

Noviembre de 2015

DEDICATORIAS

A MI FAMILIA:

PADRE: JUAN ANTONIO SÁNCHEZ BRIONES, MADRE: DELIA FLORES
SALAZAR, HERMANO: JESUS HUGO SÁNCHEZ FLORES.

Por darme el apoyo y siempre impulsarme a seguir adelante.

A MI NOVIA:

MARIA ELENA NAVARRO GERRERO.

Por apoyarme en los momentos difíciles.

A MIS COMPAÑEROS DE CARRERA:

Por apoyarme con sus conocimientos en la elaboración de esta investigación.

INDICE

RESUMEN	1
1.-INTRODUCCIÓN	2
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 OBJETIVO DE LA TESIS.....	2
1.3 HIPOTESIS	2
1.4 LÍMITES DE ESTUDIO	3
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	3
1.6 DESARROLLO	3
2.- ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL VIENTO	4
2.1 ENERGÍA DEL VIENTO	4
2.2 TURBINAS EÓLICAS	5
2.3 APLICACIÓN EN LA AERONÁUTICA	6
3.- SISTEMA ELECTRÓNICO	9
3.1 FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO	9
3.2 CONVERTIDOR ELEVADOR DE CD/CD	11
3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO	12
3.4 MODELO MATEMÁTICO	15
3.5 LINEALIZACIÓN	20
3.6 CONTROL DEL MODELO MATEMATICO	23
4.- IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA.....	27
4.1 RESPUESTA A UNA ENTRADA SINUSOIDAL.	27
4.2 RESPUESTA AL ESCALÓN EN LAZO ABIERTO.....	27
4.3 IDENTIFICACIÓN A DIVERSOS NIVELES DE CARGA	29
4.4 DISEÑO DE CONTROL A DIVERSOS NIVELES DE CARGA.....	37
4.5 CONTROL A DIFERENTES NIVELES DE CARGA	40
5.- PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO	46
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL TUNEL DE VIENTO	46
5.2 EXPERIMENTACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO	47
6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
6.1 CONCLUSIONES.....	55
6.2 RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS	57

APÉNDICE	58
1.- PWM ARDUINO.....	58
2.- CÓDIGO MATLAB DEL MODELO MATEMÁTICO	60
3.- CODIGO MATLAB MODELOS IDENTIFICADOS.....	61
4.- VI LABVIEW LAZO ABIERTO	62
6.- VI LABVIEW LAZO CERRADO	65
7.- CÓDIGO LABVIEW LAZO CERRADO	66
8.-DATOS DE LOS PUERTOS DEL NI myDAQ	68
9.-CAD DEL GENERADOR.....	69
10.- CAD ACOPLAMIENTO DEL GENARADOR.....	70
11.-DIAGRAMA DEL SISTEMA	71
AUTOBIOGRAFÍA	72

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es el diseño, construcción y prueba de un banco de trabajo, a nivel laboratorio, para la validación de aerogeneradores aplicados a vehículos aéreos.

La aplicación más conocida de los aerogeneradores en la industria aeronáutica son los generadores por impacto de aire, o RAT por sus siglas en inglés (*ram air turbine*). Estos aerogeneradores son desplegados desde el fuselaje buscando suministrar energía eléctrica como último recurso cuando existen fallas en aeronaves comerciales. Esencialmente se busca mantener energizadas las superficies de control para realizar maniobras básicas de viraje y descenso para realizar un planeo controlado y llevar la aeronave con el mejor descenso posible.

La función de estos aerogeneradores depende de factores como la velocidad viento, la corriente eléctrica demandada y la hélice utilizada, entre otros. Como resultado de la combinación de dichos factores, se busca lograr que el voltaje entregado por el aerogenerador sea constante y con baja variación, independientemente de las condiciones de velocidad viento y carga eléctrica aplicada (condiciones de operación), con la finalidad de evitar daños en los sistemas eléctricos y electrónicos en la aeronave.

Para lograr el objetivo anterior, es necesario hacer uso de circuitos electrónicos de potencia, un generador eléctrico y una hélice, capaces de funcionar como un sistema sinérgico que pruebe su correcto funcionamiento mediante experimentación en túnel de viento.

Dentro del trabajo realizado para implementar el banco de trabajo ha sido necesario:

- a) Estudiar el comportamiento, características y modelo matemático de circuitos pulsadores de potencia, analizando métodos de actuación tales como la modulación por ancho de pulso.
- b) Realizar el diseño teórico de estrategias de control automático para circuitos pulsadores de potencia.
- c) Realizar el diseño y construcción mecánica del sistema aerogenerador.
- d) Implementar algoritmos de identificación de sistemas en Matlab®.
- e) Implementar los algoritmos de control utilizando LabVIEW y plataforma MyDAQ de National Instruments®.
- f) Implementar experimentalmente, tanto estáticamente en laboratorio, como dinámicamente en túnel de viento del sistema completo.
- g) Realizar comparaciones de desempeño del aerogenerador bajo todas las condiciones de operación alcanzadas.

1.-INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

En el diseño de una aeronave, es necesario incluir sistemas de emergencia que garanticen el funcionamiento seguro aún bajo fallas graves de los subsistemas que conforman la aeronave; uno de estos subsistemas es el de abastecimiento de energía de emergencia.

Este abastecimiento de energía de emergencia se logra mediante generadores de impacto de aire que deben ser subsistemas altamente confiables, puesto que son la última fuente de energía disponible para lograr que la aeronave tenga un descenso seguro. Por esta razón, es necesaria la prueba intensiva de estos aerogeneradores en bancos de prueba especializados bajo condiciones controladas de laboratorio.

La posesión de estos bancos de prueba es una herramienta fundamental para el desarrollo de tecnología en el ámbito de aerogeneradores para aeronaves, por lo que se tienen, a saber, dos opciones: comprar los bancos de prueba a empresas privadas, generalmente del extranjero; o, diseñar, construir y probar bancos de prueba propios.

El diseño, construcción y prueba de este tipo de bancos encuadra, de una manera más adecuada, con la visión de la UANL y con la situación actual de la Ingeniería Aeronáutica, tanto a nivel local como nacional. Cabe mencionar que al desarrollar tecnología nacional se ayuda a la formación de recursos humanos altamente calificados en el área de la Ingeniería y Tecnología que son fundamentales para el fomento productivo y económico.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo de esta tesis es el diseño, construcción y prueba de un banco de trabajo, a nivel laboratorio, para el estudio, diseño y desarrollo de aerogeneradores aplicados a vehículos aéreos.

1.3 HIPOTESIS

Es posible realizar un banco de pruebas para aerogeneradores aplicados a pequeños VANTs (Vehículos aéreos no tripulados) para utilizarse como sistema de emergencia ante fallas del sistema principal de alimentación de voltaje.

1.4 LÍMITES DE ESTUDIO

En esta tesis se logró, el diseño y desarrollo de un banco de pruebas a nivel laboratorio para aerogeneradores. En este banco de pruebas es posible hacer mediciones de voltaje en la entrada, velocidad del viento además de la corriente, voltaje y potencia que recibe la carga aplicada, todo esto a través de una tarjeta de adquisición de datos. Este banco de pruebas se desarrolló a partir de componentes de fácil obtención, de un sistema de adquisición de datos estandarizado y un código de libre acceso.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La autonomía que tienen la mayoría de los vehículos aéreos no tripulados está comprendida en el rango de los 10 a los 20 minutos. Existen ocasiones en que la misión de vuelo difiere de la misión preestablecida y los vehículos aéreos se ven forzados a seguir en vuelo, poniendo en peligro la misión y la propia aeronave. Por lo tanto, es importante utilizar sistemas de abastecimiento de energía de emergencia que sean confiables y garanticen el funcionamiento mínimo de la aeronave para lograr un descenso controlado.

La implementación de un banco de pruebas para aerogeneradores es una herramienta fundamental que permitirá la prueba, bajo condiciones de laboratorio, de sistemas de generación eólica que cumplan con los requerimientos propios de los vehículos aéreos.

1.6 DESARROLLO

- 1.- Estudio de los sistemas eólicos en general.
- 2.- Estudio de los sistemas eólicos enfocados a las aeronaves.
- 3.- Estudio de circuitos de potencia basados en circuitos pulsadores convertidores CD/CD.
- 4.- Estudio en particular de los convertidores CD/CD elevadores de voltaje.
- 5.- Modelado matemático del circuito elevador de voltaje.
- 6.- Diseño y simulación en MATLAB del circuito elevador de voltaje.
- 7.- Implementación física del control utilizando herramientas como LabVIEW y sistemas de adquisición de datos.
- 8.- Identificación del circuito induciendo una señal de entrada y analizando la respuesta en la salida del sistema.
- 9.- Diseño, simulación e implementación de un nuevo control basado en la identificación del sistema.
- 10.- Implementación en un túnel de viento del sistema controlado.
- 11.- Análisis de resultados.
- 12.- Conclusiones.

2.- ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DEL VIENTO

2.1 ENERGÍA DEL VIENTO

Se sabe que en un país o región en el que la producción de energía se basa en la importación de aceite o carbón, podría aumentar su sustentabilidad utilizando fuentes de energía alternativa, tales como la energía del viento. Esta energía es libre de emisiones de CO_2 , por lo tanto no contribuyen al efecto invernadero [1].

La energía del viento representa la principal fuente de energía de nueva generación y tiene un importante papel en el mercado energético. Comparado con fuentes de energía tradicionales la energía del viento tiene múltiples beneficios [2].

El viento es el resultado del movimiento de aire debido a gradientes de presión atmosférica. El viento fluye de regiones de alta presión atmosférica, hacia regiones de baja presión atmosférica como se muestra en la Figura 2.1

La generación y movimiento del viento, es complicada debido a un número de factores. Entre estos factores se encuentran, el calentamiento irregular debido al sol, el efecto Coriolis, Figura 2.2, y también a la propia rotación de la tierra y las condiciones geográficas locales [2].

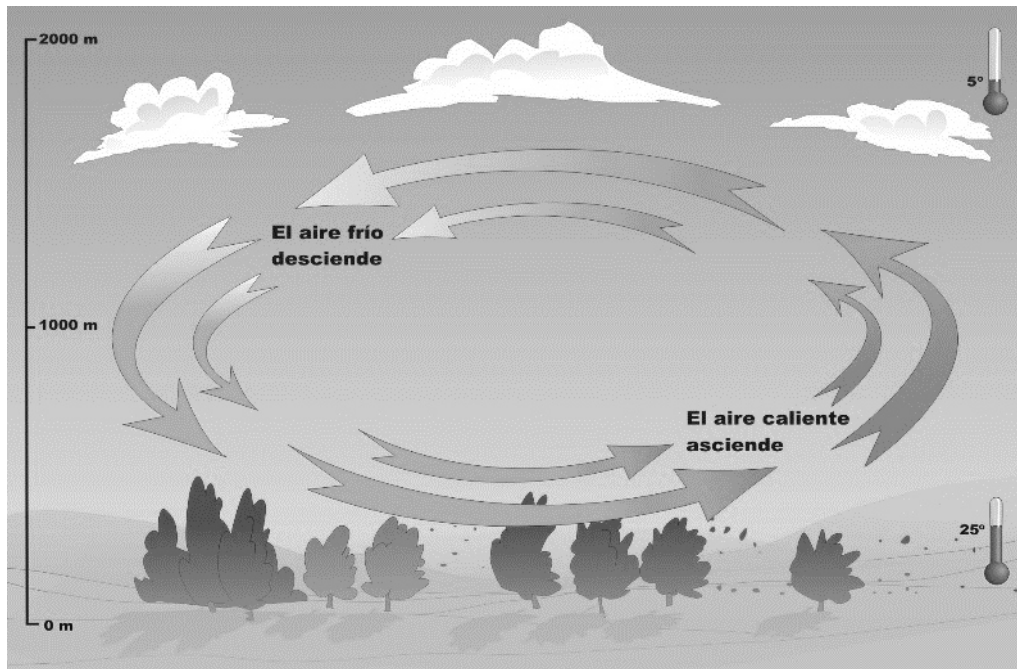


Figura 2.1 Ciclo del aire

La energía proveniente del viento es una forma específica de energía cinética en el aire, cuando fluye. Esta energía puede ser convertida en energía eléctrica mediante mecanismos de conversión o directamente utilizada para una bomba de agua o barcos de vela [2].

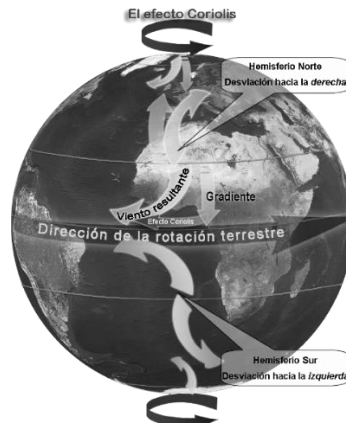


Figura 2.2 Efecto Coriolis debido a la rotación de la tierra

2.2 TURBINAS EÓLICAS

Una turbina eólica, como la de la Figura 2.3, transforma la energía cinética del viento en energía mecánica (a través de una hélice y un eje) y finalmente, en energía eléctrica (por medio de un generador eléctrico conectado al eje). De acuerdo a sus dimensiones las turbinas eólicas se pueden dividir en: micro, pequeña, mediana, grande y ultra grande.



Figura 2.3 Aerogenerador Gamesa

La velocidad rotacional del eje de una turbina eólica es aproximadamente de 10 RPM a 50 RPM y la velocidad rotacional del eje de generador eléctrico es aproximadamente de 1000 RPM a 3000 RPM [2]. Por esta razón el tren de engranajes entre el eje de baja velocidad (turbina eólica) y el eje de alta velocidad (generador eléctrico) tiene una gran importancia. En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de un tren de engranajes típico.

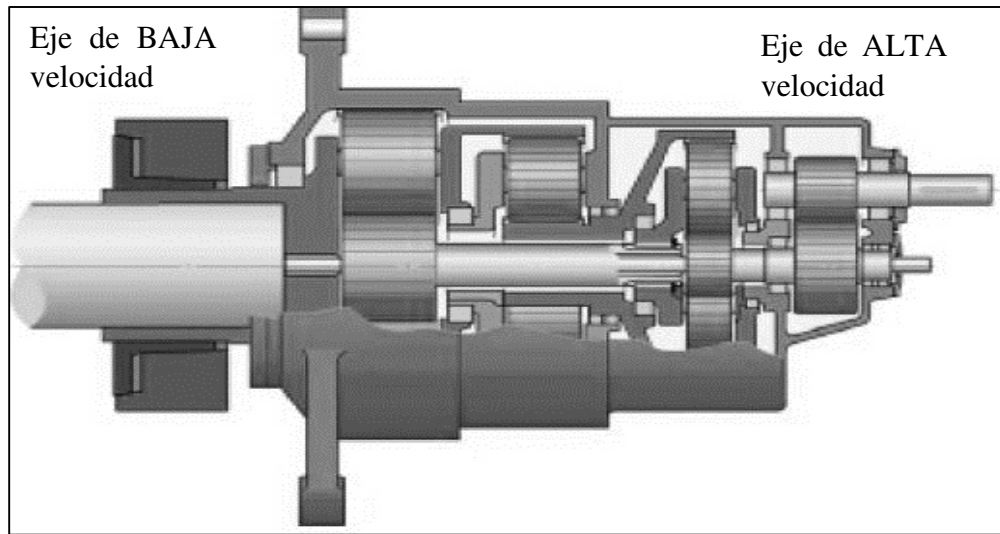


Figura 2.4 Diagrama de un tren de engranajes Bosch Rexroth

2.3 APLICACIÓN EN LA AERONÁUTICA

Dentro de los vehículos aéreos, existen sistemas de emergencia que se activan en caso de fallas graves. Uno de estos sistemas son las *Turbinas de aire por impacto* (RAT-Ram Air Turbine por sus siglas en ingles). El sistema RAT es un aerogenerador que se sitúa en el fuselaje de algunos aviones como se muestra en la Figura 2.5. Este dispositivo permite a la aeronave que en caso de falla eléctrica, sea posible disponer de energía eléctrica e hidráulica para permitir el manejo de las superficies básicas de control [3].

Cuando falla el sistema de alimentación de potencia eléctrica de la aeronave, este aerogenerador es desplegado y aprovecha el choque de aire propio de la velocidad con que viaja el avión para generar energía eléctrica con el cual se garantiza el funcionamiento mínimo de las superficies de control que se muestran en la Figura 2.6. Los sistemas de generación basados en las turbinas de aire RAM (palabra en ingles que significa impacto o choque) deben ofrecer una fiabilidad muy alta, debido a que representan el último respaldo de energía para los sistemas vitales cuando solo la batería no puede proveer de energía completamente en un caso de emergencia [4]. En la Figura 2.7 se muestra la RAT de una aeronave Airbus A-320.

La energía del sistema RAT depende de la velocidad del avión, esto es, a más velocidad más potencia y a menos velocidad menos potencia, en la Figura 2.8 se muestra la función de un generador por impacto de aire. Por lo regular, estos sistemas suelen generar entre 5 KW y 70 KW de potencia [3].

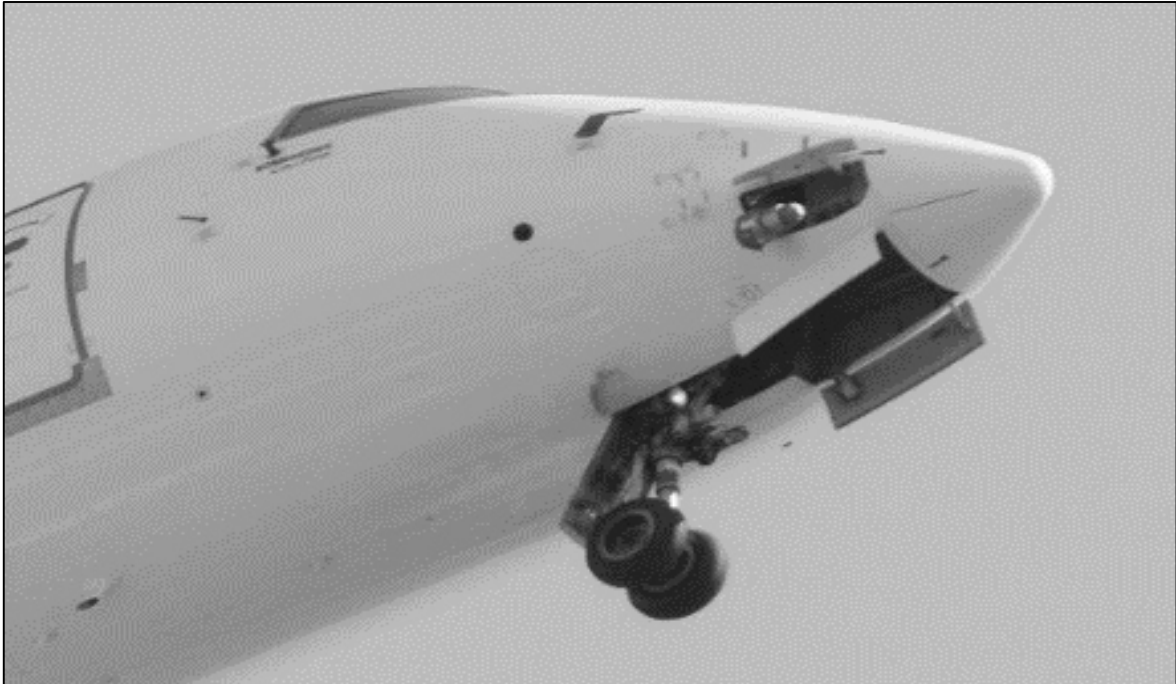


Figura 2.5 Sistema RAT BOMBARDIER CRJ700

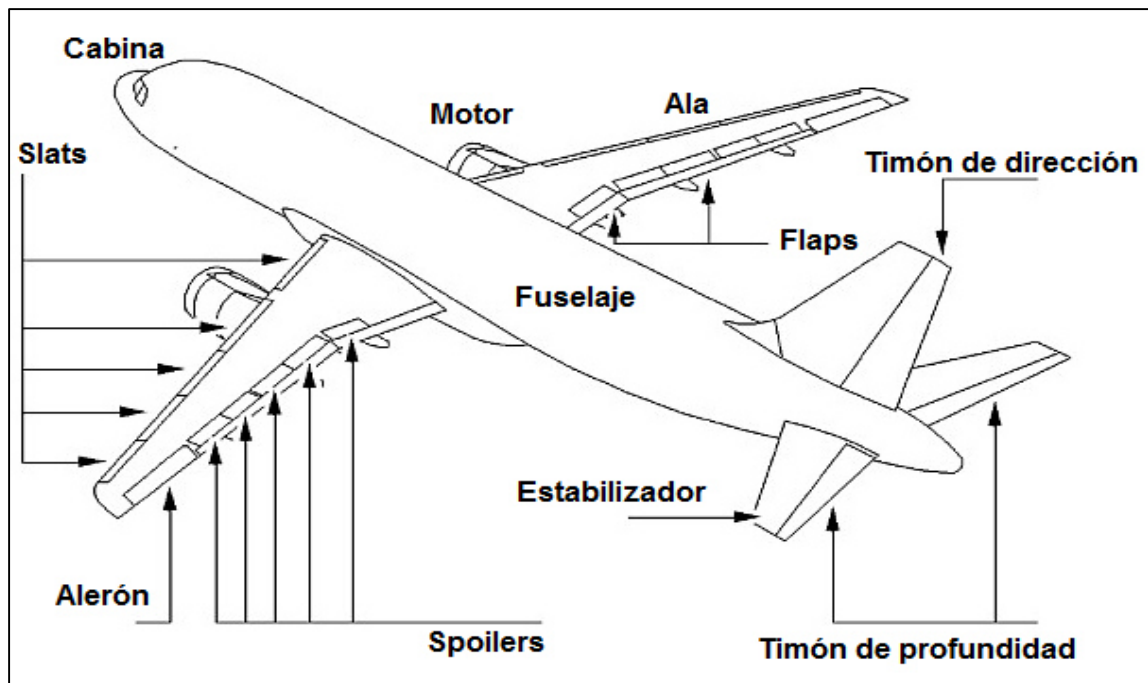


Figura 2.6 Diagrama de una aeronave estándar.

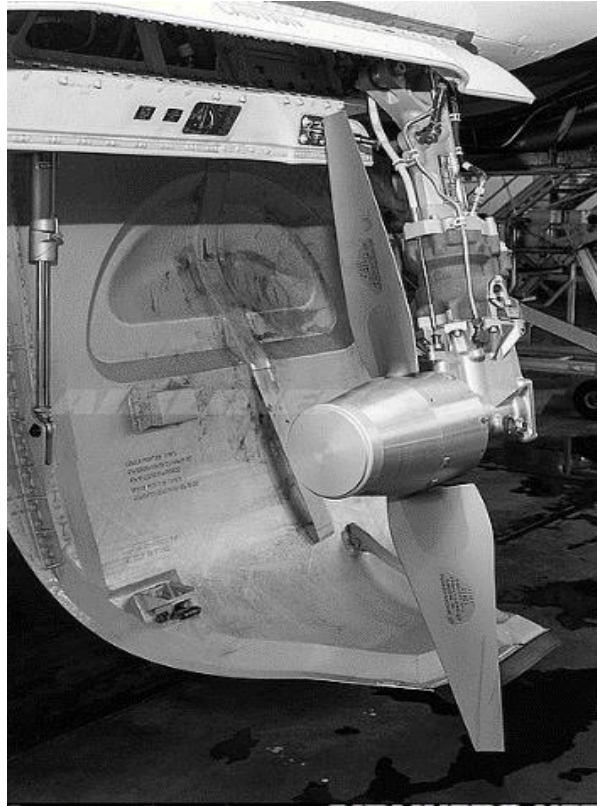


Figura 2.7 Sistema RAT de un Airbus A320-232

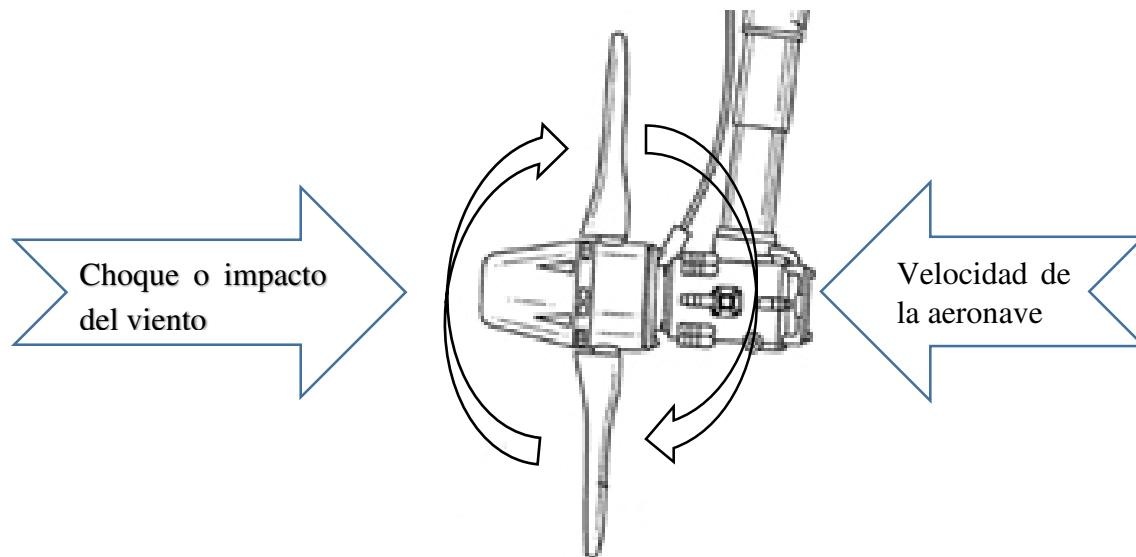


Figura 2.8 Diagrama de interacción de fuerzas en un sistema RAT

3.- SISTEMA ELECTRÓNICO

3.1 FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO

CIRCUITOS CONVERTIDORES CD/CD MODO POR CAMBIO DE ESTADO ENCENDIO/APAGADO (ON-OFF)

Los convertidores CD/CD son ampliamente utilizados en fuentes de poder reguladas y aplicaciones en las que se requiere alimentar motores de corriente directa. Estos son utilizados para convertir una entrada de voltaje no regulada a una salida de voltaje controlado de CD [7, 8].

Las configuraciones básicas de los convertidores CD/CD son:

1. - Convertidor reductor (*step-down or buck converter*).
2. - Convertidor elevador (*boost converter*).
3. - Convertidor reductor-elevador (*step-down/step-up or buck-boost*).
4. - Convertidor Cuk (*Cuk Converter*).
5. - Convertidor de puente completo (*Full-bridge converter*).

De estos cinco convertidores solo el convertidor reductor y el convertidor elevador manejan una topología básica. Los otros convertidores se componen de topologías que son el resultado de la combinación de las primeras dos [7, 8].

En este trabajo se utiliza el convertidor elevador debido a que sus características son apropiadas para utilizarse en aerogeneradores para aeronaves de pequeña escala.

CONTROL DE UN CONVERTIDOR CD/CD

En un convertidor de voltaje CD/CD el promedio de voltaje de salida es controlado variando el tiempo de conmutación entre encendido y apagado.

Una de las técnicas para el control del voltaje de salida, en un convertidor de CD/CD , consiste en emplear el método de conmutación a frecuencia constante: se establece el periodo de cambio de estado en el que el tiempo total, es $T_s = T_{on} + T_{off}$. En este procedimiento se ajusta la duración del tiempo encendido, T_{on} , en relación al tiempo de apagado, T_{off} , para controlar el promedio de voltaje de salida [8]. Se define al ciclo de trabajo, D , como la relación entre el tiempo de encendido y el tiempo total (T_{on}/T_s). A éste método de operación se le conoce como *modulación por ancho de pulso PWM* (Pulse Width Modulation).

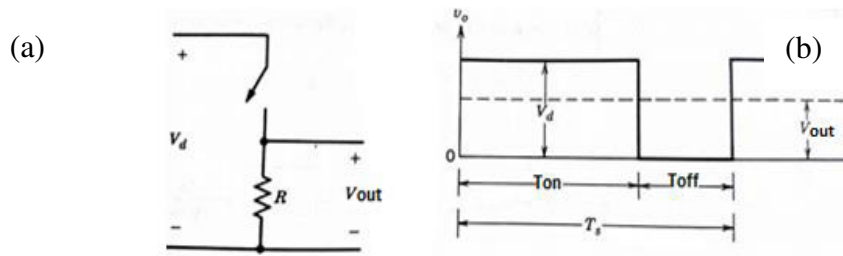


Figura 3.1 Conversión CD/CD por cambio de estado

Para ejemplificar el concepto de la conversión de CD/CD por PWM, se muestra un convertidor básico CD/CD en la Figura 3.1(a). El valor promedio del voltaje de salida, V_{out} , se muestra en la Figura 3.1(b). En dicha figura se puede ver gráficamente la dependencia del voltaje de salida y los estados T_{on} y T_{off} [8].

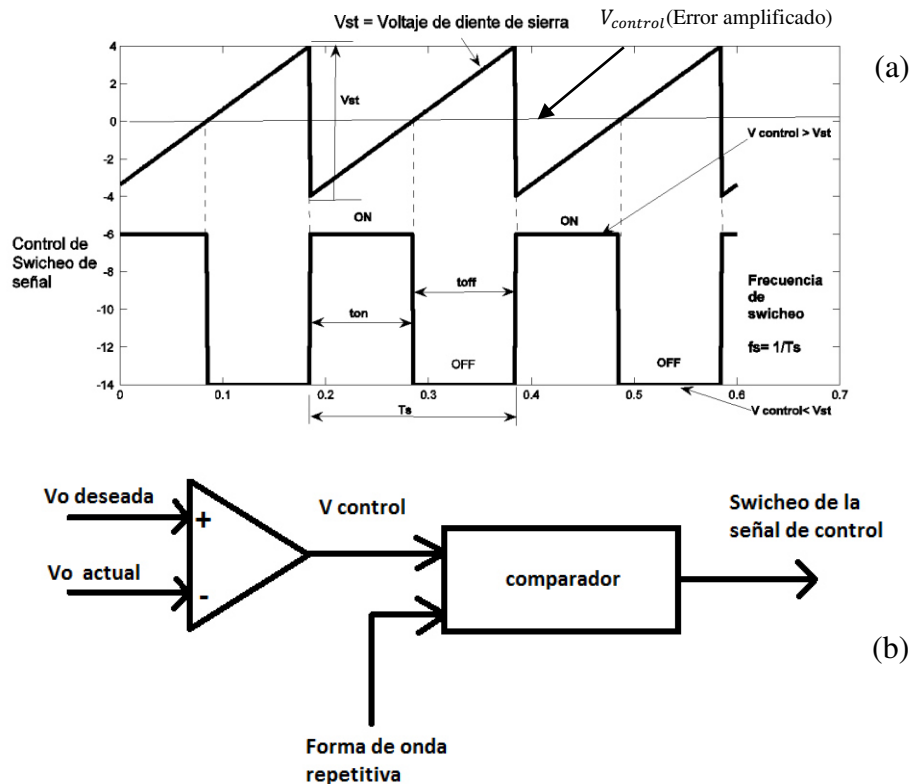


Figura 3.2 (PWM) : (a) Diagrama de bloques; (b) Comparacion de señales

En un PWM el cambio de estado en la señal se realiza a una frecuencia constante, este cambio de control ON u OFF se genera al comparar un nivel de señal de voltaje, $V_{control}$ (Figura 3.2 (b)), con una señal periódica, por ejemplo, la señal diente de sierra mostrada en la Figura. 3.2(a).

La señal de voltaje de control se obtiene amplificando el error, que es la diferencia entre el voltaje actual de salida y el valor deseado (V_o deseada). La frecuencia de la señal

periódica establece la frecuencia de conmutación, y para el PWM se utilizan frecuencias en un rango de los kilohertz a los cientos de kilohertz.

El ciclo de trabajo de la conmutación también se puede expresar como:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{\widehat{V}_{st}} \quad (3-1)$$

donde \widehat{V}_{st} es el voltaje pico de la señal de diente de sierra.

Los convertidores CD/CD se caracterizan por tener dos modos de operación distintos: modo conducción continua y modo de conducción discontinua.

3.2 CONVERTIDOR ELEVADOR DE CD/CD

La configuración básica de un convertidor elevador de voltaje se muestra en la Figura 3.3. Una de sus principales aplicaciones son las fuentes reguladas de corriente directa y el frenado regenerativo de los motores de CD . Como su nombre lo indica, la salida de voltaje de este circuito siempre es mayor al voltaje que se presenta en la entrada.

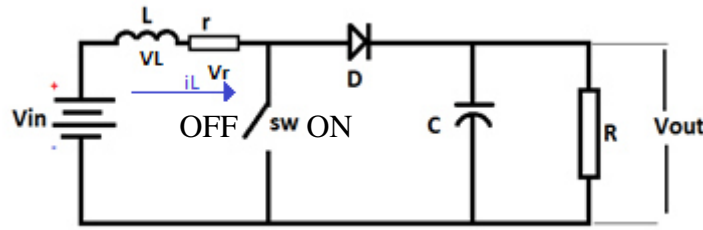


Figura 3.3 Configuración básica de un convertidor elevador de CD/CD elevador

Cuando el interruptor permanece en el modo ON el diodo deja de tomarse en cuenta. El voltaje de entrada, V_{in} , suministra energía al inductor, cuando el interruptor cambia a modo OFF la salida recibe la energía del inductor directamente. En estado estacionario el capacitor actúa como un filtro que mantiene el voltaje de salida constante $V_{out}(t) \cong V_{out}$.

MODO DE OPERACION

En la Figura 3.4 se puede observar que las formas de onda para los modos de operación donde la corriente del inductor fluye continuamente $[i_L(t) > 0]$.

Si ambos lados son divididos por T_s y se reasignan términos, se obtiene la siguiente ecuación que describe la relación que existe entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida

$$\frac{V_{OUT}}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (3-2)$$

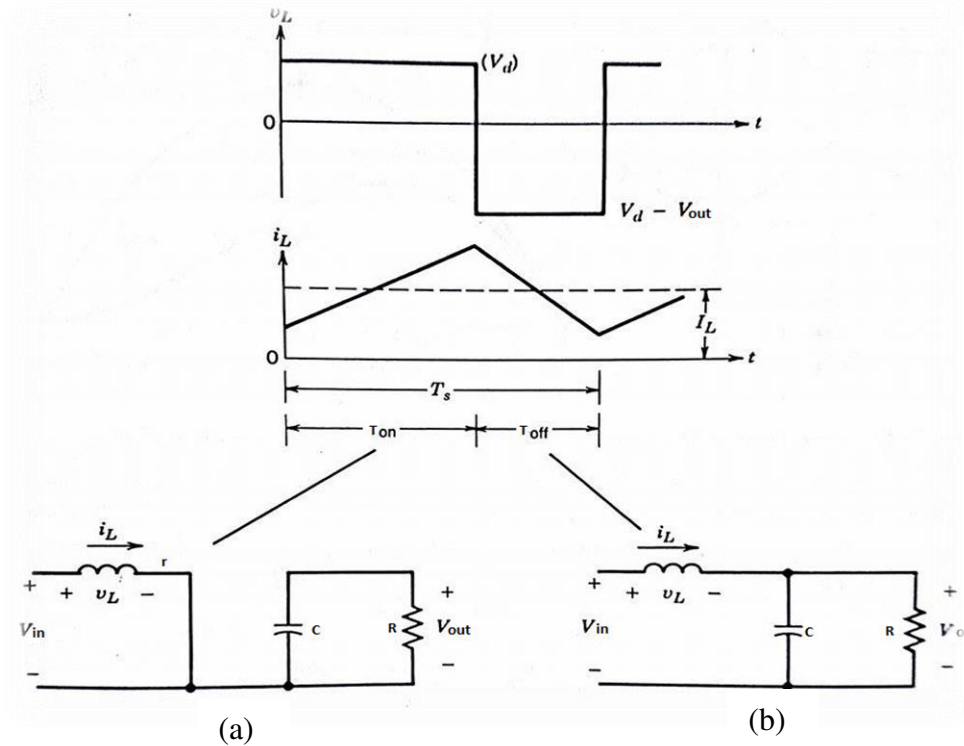


Figura 3.4 Modo de conduccion continuo: (a) interruptor ON; Modo de conducción discontinuo (b) interruptor OFF

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO

Con el fin de comprobar el funcionamiento del circuito convertidor elevador de voltaje, se propone el siguiente esquema de trabajo, el cual se describe a continuación en la Figura 3.5. La implementación física se muestra en la Figura 3.6

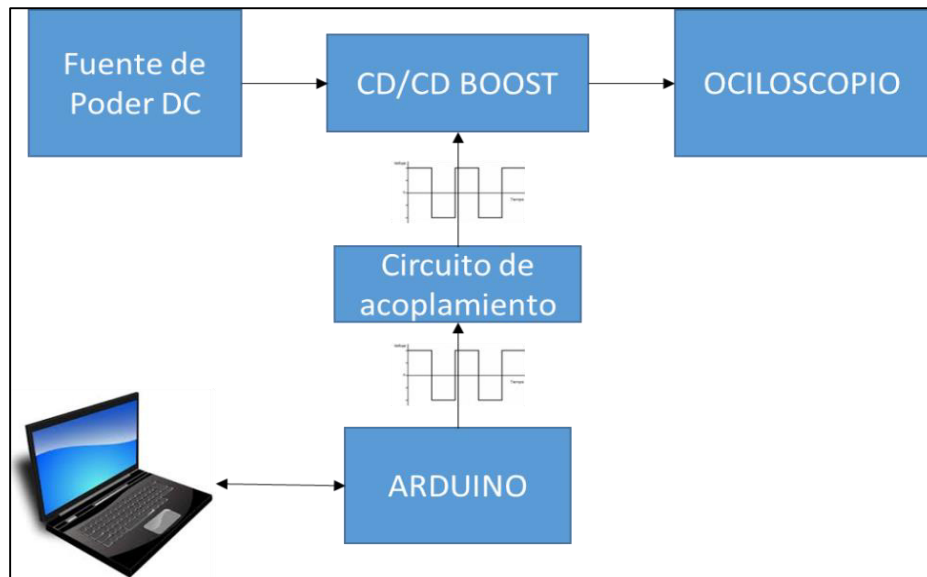


Figura 3.5 Esquema de trabajo propuesto para pruebas del circuito convertidor elevador de voltaje

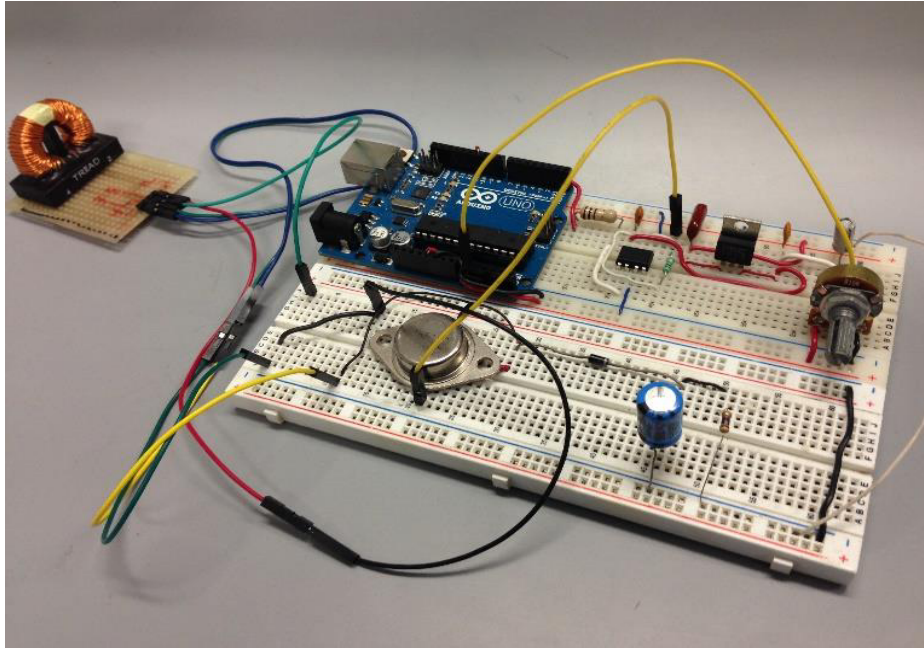


Figura 3.6 Implementación física del circuito

Esta implementación consta de 4 etapas las cuales se describen a continuación.

- 1.- Programación de un PWM en la plataforma de desarrollo Arduino, esto debido a la facilidad de implementación. Utilizando una de las entradas analógicas de Arduino, se conecta un potenciómetro de aproximadamente 10KΩ. Este potenciómetro servirá para variar el ancho del pulso, D , del PWM.
- 2.- Por motivos de protección del circuito, la señal producida por el Arduino pasa por un circuito llamado de acoplamiento, esta protección consiste en aislar la tierra del arduino de la tierra del circuito convertidor elevador de voltaje.
- 3.-Una señal a frecuencia constante de 3936hz resivirá el MOSFET del circuito convertidor elevador de voltraje. Este circuito resivirá un voltaje de entrada de 6V. Al manipular el potenciómetro se modifica el ancho de pulso con valores que van del 10 al 90 % .
- 4.- Para comprobar el funcionamiento del circuito se despaja el voltaje de salida V_{out} de la ecuación 3-2

$$V_{out} = V_{in} * \frac{1}{1 - D} \quad (3-3)$$

A continuación se presentan los resultados del experimento:

3936 Hz	1V	2V	3V	4V	5V	6V	7V	8V	9V	10V	11V	12V
D=10%	0,6	1,6	2,7	3,8	5	6	7,2	8,2	9,2	10,5	11,5	12,6
D=20%	0,7	1,9	3,1	4,4	5,6	6,9	7,1	9,4	10,6	12,1	13,1	14,4
D=30%	0,9	2,3	3,7	5	6,5	8	9,2	10,6	12,1	13,3	14,8	16,2
D=40%	1,2	2,8	4,4	5,9	7,5	9,2	11,2	12,6	14,4	15,8	17,3	19,1
D=50%	1,4	3,3	5,4	7,4	9,3	11,5	13,1	15,2	17,4	19,3	21,2	23,3
D=60%	1,9	4,4	6,7	9,1	11,6	14,1	16,5	18,8	21,4	24	26,8	29
D=70%	2,6	5,9	9	12,2	15,3	18,3	21,5	25,1	27,9	31,6	34,2	37,7
D=80%	4	9	13,9	18	23,1	28,1	32,6	38	36			
D=90%	7,7	16,5	24,6	32,3	35,5							

Tabla 3.1 Resultados del experimento con el circuito elevador (Voltaje de entrada contra ancho de pulso).

Se muestra a continuación una comparativa del comportamiento del circuito en la experimentación contra el resultado esperado aplicando la fórmula (3-3). Considerando un voltaje de entrada de 6 V

Para este experimento se utilizó una fuente con una capacidad máxima de 6V a 5A.

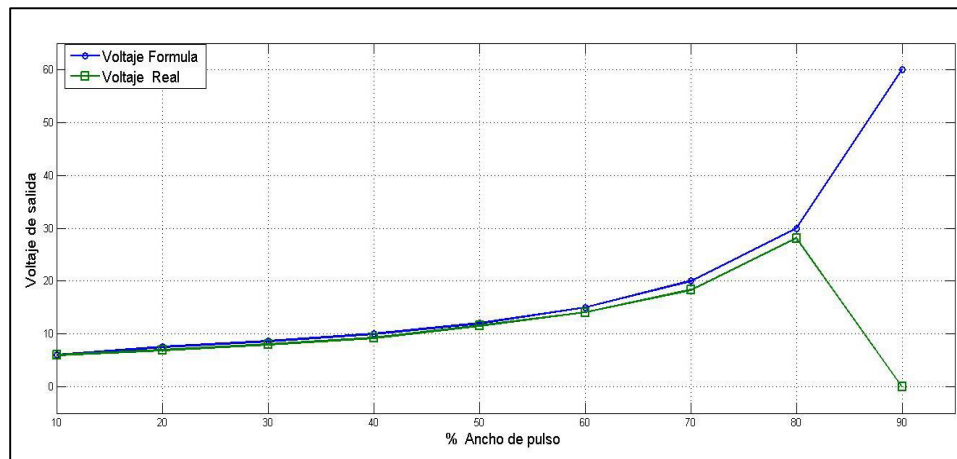


Figura 3.7 Resultados reales contra resultados de la fórmula

Se comprueba en la Figura 3.7 que los resultados son muy parecidos, sin embargo cuando el ancho de pulso alcanza valores arriba del 80% el resultado cambia. Por un lado se tiene el resultado teórico, que sugiere que es posible aumentar el voltaje después del 80% del ancho de pulso, con un máximo de 60 V de salida teóricos. Por otro lado los resultados experimentales muestran que para anchos de pulso mayores al 80% el voltaje tiende a disminuir.

La diferencia de estos dos resultados es debido a la corriente que el circuito demanda a la fuente. La corriente aumenta conforme aumenta el ancho de pulso del PWM, en un caso práctico. Mientras que en la fórmula (3-3) no se considera la corriente, por lo que el valor de la corriente tiende a ser infinito. Por lo que la caída en el voltaje al llegar al 80% del ancho

de pulso se debe a que en este punto la corriente que demanda el circuito excede a la corriente que la fuente puede entregar.

CONCLUSIONES PARCIALES

Se comprueba que la fórmula básica para calcular el voltaje de salida de un circuito convertidor elevador de voltaje es aproximada a la realidad y es posible basar los cálculos de diseño en esta fórmula siempre y cuando se tomen en cuenta las limitantes de voltaje y corriente de la fuente además de el porcentaje de ancho de pulso

3.4 MODELO MATEMÁTICO

Una vez que se conoce el comportamiento teórico del sistema, se procede a obtener un modelo matemático. Esto servirá para describir de una mejor manera el funcionamiento del circuito. Para esto se deben conocer los componentes básicos. Estos se muestran en la Figura 3.8

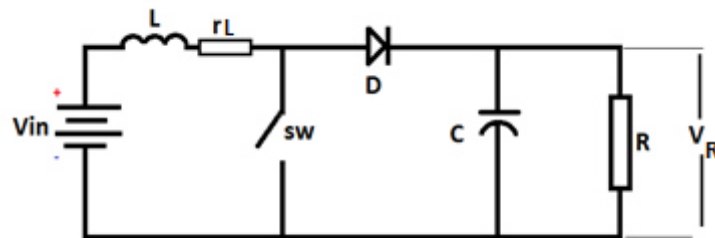


Figura 3.8 Configuración de un convertidor CD/CD y sus componentes básicos

Conociendo el modelo matemático de cada componente del circuito se puede empezar idear un modelo matemático que sea capaz de describir el funcionamiento del convertidor CD/CD elevador.

Analizando el circuito en modo continuo obtenemos la siguiente suma de voltajes.

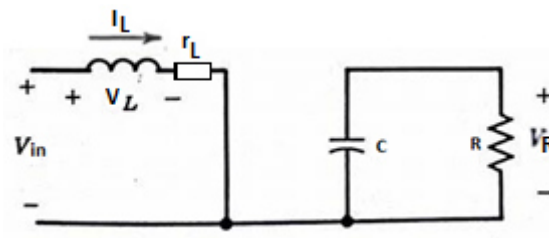


Figura 3.9. Modo continuo

La suma de voltajes en la malla izquierda es:

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} + i_L r_L \quad (3-3)$$

donde i_L es la corriente que pasa por el inductor.

El comportamiento de los otros componentes del circuito se modela de la siguiente manera.

$$C \frac{dV_R}{dt} = -\frac{V_R}{R} \quad (3-4)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones de modo continuo el siguiente paso es analizar el circuito en modo discontinuo, esto es, cuando el interruptor *sw* se encuentra abierto.

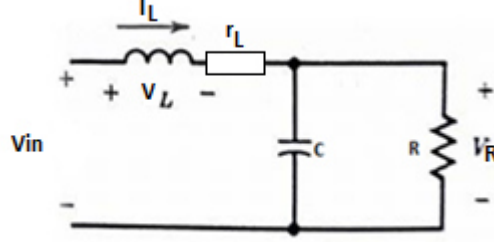


Figura 3.10 Modo discontinuo

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} + i_L r_L + V_R \quad (3-5)$$

$$i_R = C \frac{dV_R}{dt} + \frac{V_R}{R} \quad (3-6)$$

Es posible combinar las ecuaciones de los dos modos de operación para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento del circuito.

Para esto es necesario agregar una variable que marque la diferencia entre un modo y el otro. Esta variable es el ciclo de trabajo del PWM, que en nuestro caso la representaremos como *D*. El rango de valores de *D* es de 0.1 a 0.9 [9].

$$V_{in} = L \frac{di_L}{dt} + i_L r_L + V_R D \quad (3-7)$$

$$D i_R = C \frac{dV_R}{dt} + \frac{V_R}{R} \quad (3-8)$$

Se despeja de (3-7) la derivada de la corriente se obtiene:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - i_L r_L - V_R D) \quad (3-9)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} - \frac{i_L r_L}{L} - \frac{V_R D}{L} \quad (3-10)$$

Se despeja la derivada de voltaje de (3-8) se tiene:

$$\frac{Di_R}{C} - \frac{V_R}{CR} = \frac{dV_R}{dt} \quad (3-11)$$

$$\frac{1}{C} \left(Di_R - \frac{V_R}{R} \right) = \frac{dV_R}{dt} \quad (3-12)$$

$$\frac{i_R}{C} - \frac{1}{R} V_R = \frac{dV_R}{dt} \quad (3-13)$$

De donde se obtienen las dos ecuaciones de primer orden representativas del circuito.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - i_L r_L - V_R D) \quad (3-14)$$

$$\frac{dV_R}{dt} = \frac{1}{C} \left(Di_R - \frac{V_R}{R} \right) \quad (3-15)$$

Estas ecuaciones son no lineales debido a que los coeficientes no dependen solamente de la variable independiente o constante sino que también dependen de la variable D por lo que posteriormente se procede a obtener un modelo lineal para continuar con el diseño del controlador. La razón para utilizar control lineal es debido a que resulta más siempre de resolver.

Modelo en espacio de estados no lineal.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_R}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{V_R}{L} \\ \frac{i_R}{C} \end{bmatrix} D + \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

Para comprobar el comportamiento de estos modelos se procede a implementar las ecuaciones (3-7) y (3-8) Matlab/Simulink como se muestra en la Figura 3.11

Utilizando los valores de los componentes.

$R = 1000\Omega$
$r_L = .6\Omega$
$C = 1000\text{mf}$
$V_{in} = 6\text{V}$
$U = D = .5 = 50\%$
$L = 110\text{ mH}$

Tabla 3.2 Valores de los componentes del circuito convertidor elevador

En la Figura 3.11 se muestra la representación en Simulink de las ecuaciones representativas (3-14), (3-15) se encuentran dentro del bloque DC/DC Boost converter Figura 3.12

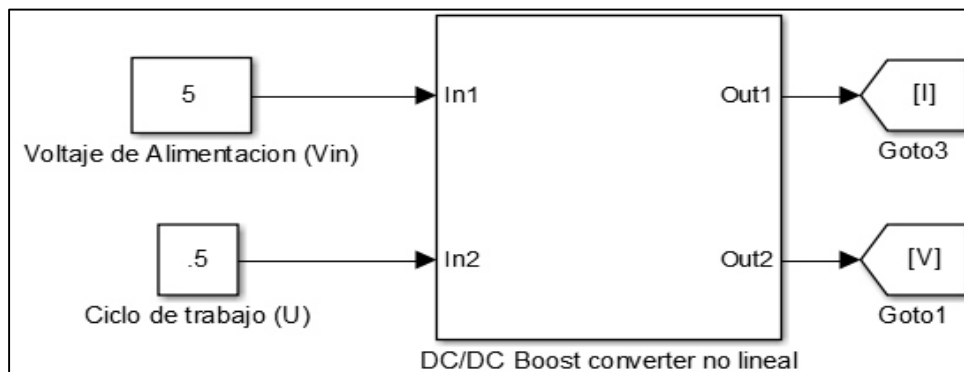


Figura 3.11 Representación en Simulink de las ecuaciones del circuito

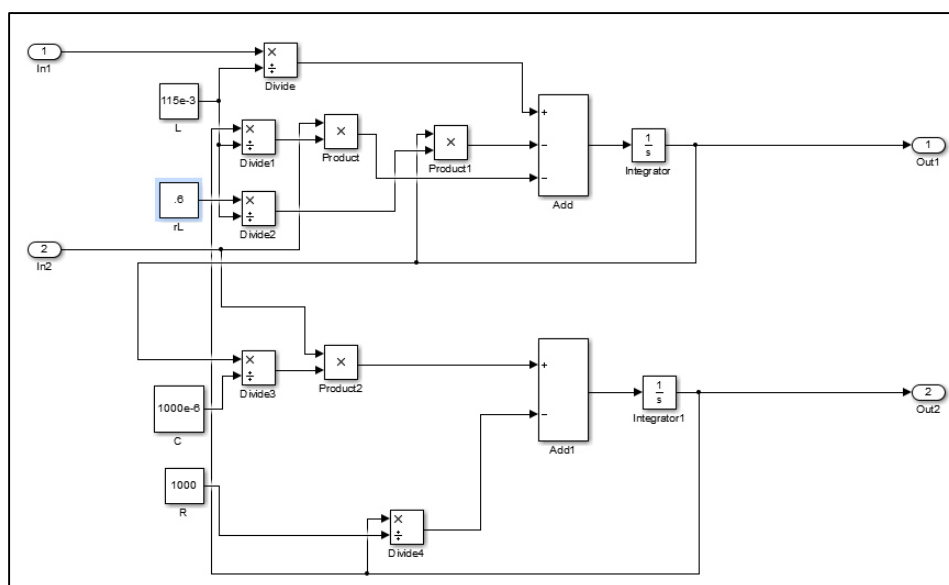


Figura 3.12 Representación de las ecuaciones características del circuito

En las Figuras 3.13 y 3.14 se presentan los resultados obtenidos:

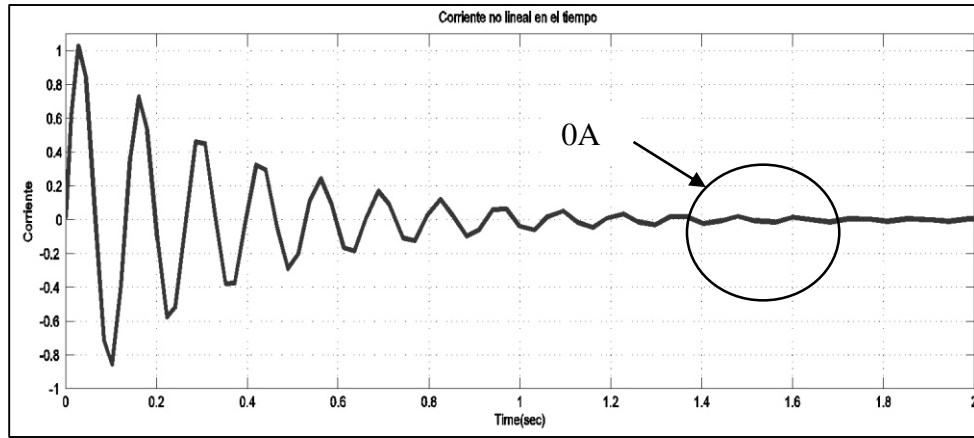


Figura 3.13 Respuesta de la corriente de salida en el tiempo

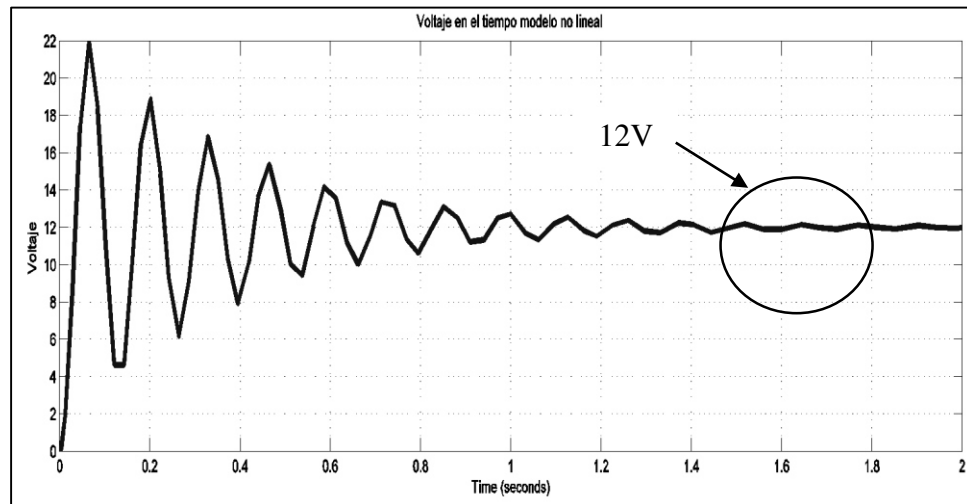


Figura 3.14 Respuesta del voltaje de salida en el tiempo

Una vez obtenidas las respuestas del sistema es posible comprobar que el funcionamiento es correcto de acuerdo con la ecuación (3-3).

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

$$V_{out} = \frac{6V}{1 - .5}$$

$$V_{out} = 12V$$

El valor del voltaje de entrada V_{in} depende de factores tales como la velocidad del viento el cual es variable, también dependerá de la aerodinámica de las hélices y de la eficiencia del generador seleccionado. Dado que se busca que el voltaje se incremente a un valor de salida constante.

3.5 LINEALIZACIÓN

De las ecuaciones (3-13) y (3-14) se considera que las condiciones de equilibrio se presentan cuando $\frac{di_L}{dt} = 0$ y $\frac{dV_R}{dt} = 0$

$$V_{in} = i_L r_L + V_R * D \quad (3-18)$$

$$Di_R = \frac{V_R}{R} \quad (3-19)$$

Los valores paramétricos de los componentes utilizados son:

$R = 1000\Omega$
$r_L = .6\Omega$
$V_{in} = 6V$
$D = .5 = 50\%$

Tabla 3.3 Valores de los componentes y parametros de entrada y salida (D y Vin)

$$V_{in} - i_L r_L + V_R D = 0 \quad (3-20)$$

$$Di_R - \frac{V_R}{R} = 0 \quad (3-21)$$

Despejando V_{out} de la ecuación (3-21).

$$-\frac{V_R}{R} = -(D)(i_R)$$

$$V_R = (D)(i_R)(R) \quad (3-22)$$

Se sustituye V_R de la ecuación (3-21) en (3-22) se obtiene.

$$V_{in} - i_L r_L + -(D)(i_R)(-R) D = 0 \quad (3-23)$$

Ahora sustituyendo los valores de los componentes en (3-23) y despejando el valor de corriente i se obtiene su valor en un punto de operación.

$$i_R = \frac{-6}{-250.6} = .02394A$$

Una vez que se obtiene el valor de la corriente, el siguiente paso es obtener el valor del voltaje para esto se sustituye el valor de la corriente en la ecuación (3-22).

$$V_R = -(D)(i_R)(-R)$$

$$V_{out} = 11.97V$$

Una vez que se obtienen los puntos de operación del sistema se puede linealizar.

El modelo linealizado se obtiene de la siguiente forma:

$$\Delta \dot{X} = \frac{\partial \dot{X}}{\partial y} \Delta X + \frac{\partial \dot{X}}{\partial u} \Delta u \quad (3-24)$$

$$\frac{\partial \dot{X}}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial i} & \frac{\partial f1}{\partial v} \\ \frac{\partial f2}{\partial i} & \frac{\partial f2}{\partial v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{D}{L} \\ \frac{D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

$$\frac{\partial \dot{X}}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial u} \\ \frac{\partial f2}{\partial u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_R}{L} \\ \frac{i_R}{C} \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

Sustituyendo los valores obtenemos las siguientes matrices de estado

$$A = \begin{bmatrix} -5.4545 & -4.5455 \\ 500 & -1 \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

$$B = \begin{bmatrix} 108.8297 \\ 23.94 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

Obteniendo las siguientes funciones de transferencia para la corriente y el voltaje

$$G_i(s) = \frac{di_R(s)}{du(s)} = \frac{108.8s}{s^2 + 6.45s + 2278} \quad (3-30)$$

$$G_v(s) = \frac{dV_R(s)}{du(s)} = \frac{23.94s + 5.455 * 10^4}{s^2 + 6.45s + 2278} \quad (3-31)$$

$G_i(s)$ Representa la función de transferencia de la corriente con respecto a la entrada de control $U = D$.

$G_v(s)$ Representa al voltaje de salida, V_R , con respecto a la entrada de control $U = D$.

El siguiente paso es comparar el modelo lineal obtenido con el modelo no lineal.

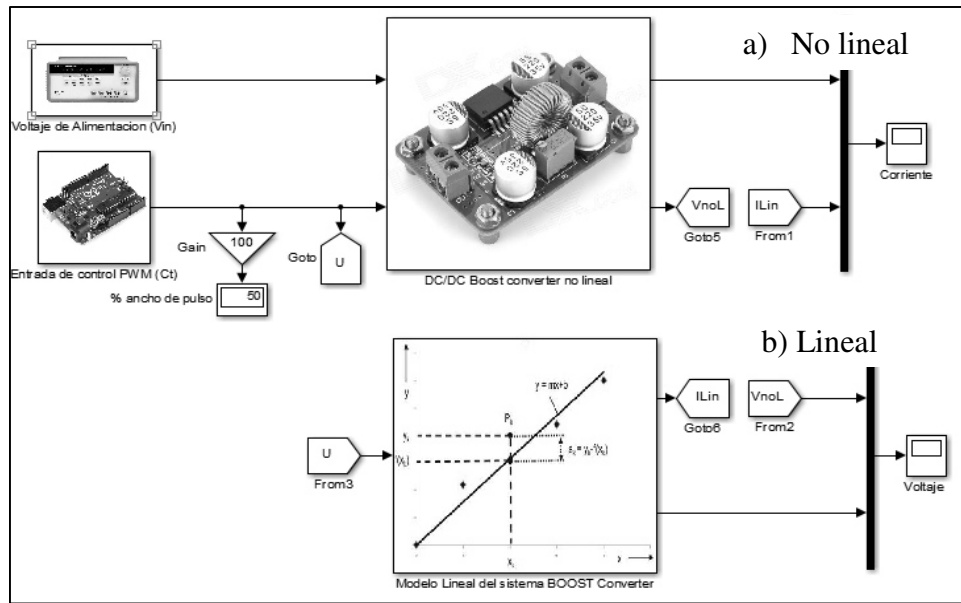


Figura 3.15 Comparación lineal (b) y no lineal (a) Simulink

A continuación se presentan los resultados:

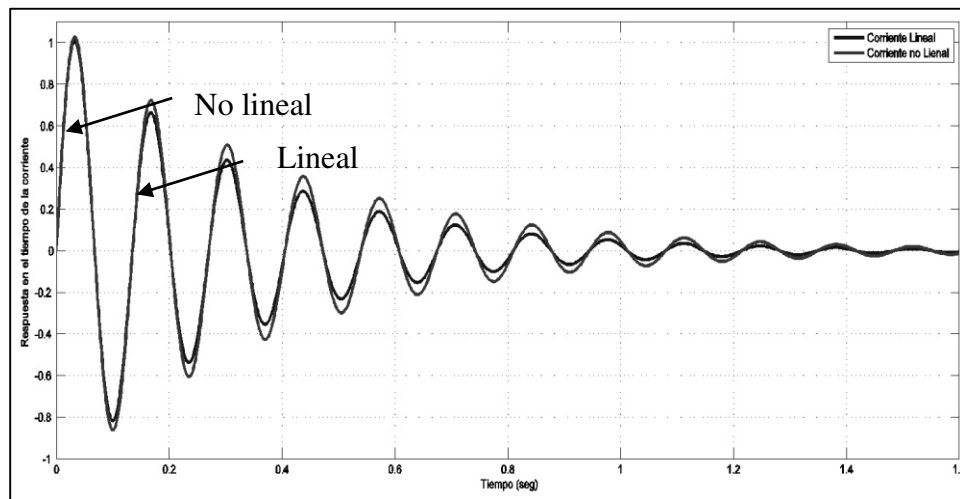


Figura 3.16 Comparación de la ecuación lineal y no lineal de la respuesta en corriente

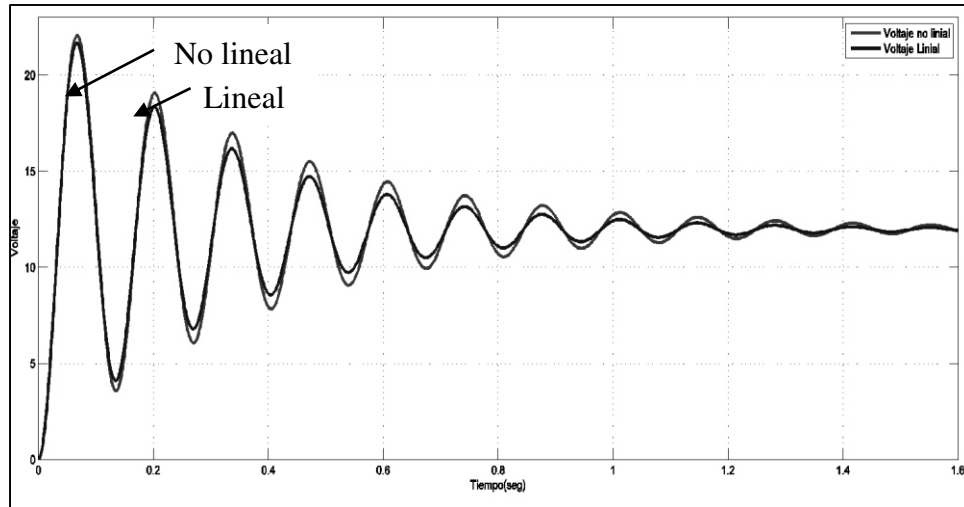


Figura 3.17 Comparación de la ecuación lineal y no lineal de la respuesta en Voltaje

Con esta comparación es posible notar que tanto el modelo lineal como el no lineal mantienen una correlación y responden de la misma manera a la entrada con diferencias mínimas en la amplitud del transitorio.

3.6 CONTROL DEL MODELO MATEMATICO

Con la energía producida por el circuito convertidor elevador de voltaje, se busca recargar baterías que usualmente son utilizadas en aeromodelismo, estas baterías son delicadas y susceptibles a daños a cambios bruscos de corriente y voltaje.

Algunas de las características que se buscan mejorar son:

Una respuesta rápida en el transitorio. Esto es necesario debido que entre más rápido llegue al valor de estado estacionario la batería correrá menos riesgo de dañarse.

Otra característica es reducir el sobrepaso presentado en la respuesta transitoria. Esto también es de suma importancia ya que picos muy altos de voltaje podrán poner en riesgo la integridad de la batería o reducir su tiempo de vida útil.

También es importante el diseño de un controlador, ya que hasta este momento el circuito elevador se modela con base a un voltaje de entrada V_{in} constante. En esta investigación se considera al voltaje de entrada V_{in} variable. Por lo tanto el controlador debe ser capaz de minimizar los efectos causados por la variación del voltaje de entrada V_{in} .

Por esta razón, a partir de este momento se trabaja con la función de transferencia de la entrada de control con respecto al voltaje de salida.

$$GV(s) = \frac{23.943(s + 2278)}{(s^2 + 6.45s + 2278)} = \frac{23.94s + 5.455 \cdot 10^4}{s^2 + 6.45s + 2278} \quad (3-32)$$

Se propone el siguiente controlador el cual consiste en el inverso de la planta más un integrador y la adición de un polo en -50000

$$C(s) = \frac{500s^2 + 3228s + 1.139 * 10^6}{.0004788s^3 + 25.03s^2 + 54550s} \quad (3-33)$$

$$= \frac{1.0443 * 10^6 (s^2 + 6.45s + 2278)}{s(s + 5 * 10^4)(s + 2278)}$$

Obteniendo los siguientes diagramas de bode.

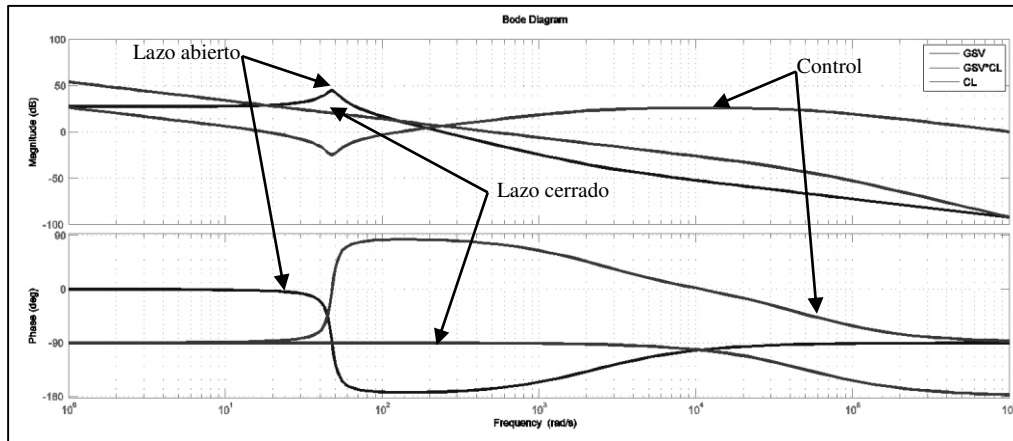


Figura 3.18 Comparación entre los diagramas de Bode del circuito convertidor elevador de voltaje sin controlador, del circuito convertidor elevador de voltaje con controlador y controlador.

Se observa que el controlador $C(s)$ invierte la dinámica del circuito convertidor elevador de voltaje, GSV. Al hacer esto se elimina el pico de resonancia que se tiene en el margen de ganancia y aumentar el margen de fase disminuyendo el riesgo del cruce por -180° .

PRUEBAS EN BANCO (LABORATORIO)

Hasta este momento se trabajó con Matlab© debido a que es un entorno más flexible para el diseño matemático.

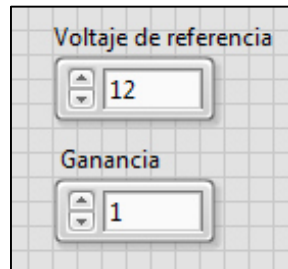
Para implementar el controlador en la práctica se usó el software LabVIEW© debido a que maneja un entorno gráfico de programación además de contar con interfaz gráfica para monitoreo de datos.

Para implementar el PWM se cambió la tarjeta de desarrollo de Arduino por una tarjeta de adquisición de datos de NI myDAQ. Es posible realizar también esta adquisición en Matlab. La desventaja es que requiere la instalación de diversas librerías.

Además fue necesario la utilización de tablilla perforada para la implementación de los circuitos, con esto se elimina la presencia de ruido en el circuito y falsos contactos

Resultados de la implementación del controlador

Antes de iniciar el programa, es necesario asegurar un valor de referencia del voltaje, este valor de referencia es el voltaje deseado en la salida y además una ganancia para el controlador como se muestra en la Figura 3.19 Esta ganancia es un valor establecido que se utiliza para aumentar o disminuir la ganancia proporcional del sistema, en caso de ser necesario. Para revisar los detalles del programa completo en lazo cerrado revisar el Apéndice en el apartado 6



The image shows a control interface with two input fields. The first field is labeled "Voltaje de referencia" and contains the value "12". The second field is labeled "Ganancia" and contains the value "1". Both fields have up and down arrow buttons for adjustment.

Figura 3.19 Datos de entrada de la programación.

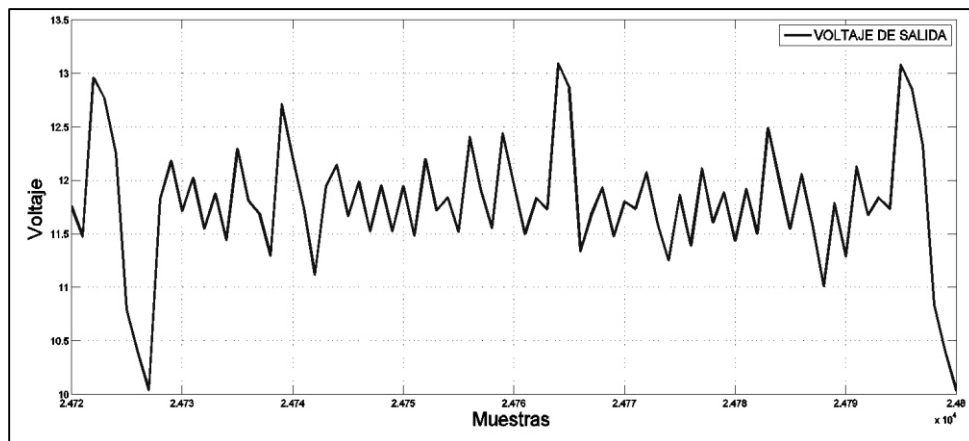
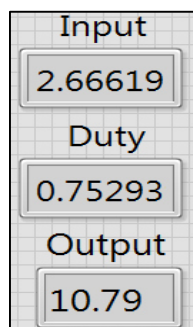


Figura 3.20 Gráfica de los datos obtenidos



The image shows a control interface with three input fields. The first field is labeled "Input" and contains the value "2.66619". The second field is labeled "Duty" and contains the value "0.75293". The third field is labeled "Output" and contains the value "10.79". All fields have up and down arrow buttons for adjustment.

Figura 3.21 Datos del sistema

En la figura 3.21 se muestra de manera numérica los datos obtenidos en el experimento en donde Input corresponde al voltaje de alimentación del sistema, Duty es el ancho de pulso del PWM y Output es el voltaje de salida

En este experimento se observa que el control responde de manera muy rápida a la perturbación, al variar el voltaje de entrada, no se alcanza a percibir el cambio en el voltaje de salida, además de un claro seguimiento a la referencia.

En cambio la respuesta de salida de la Figura 3.20 es inestable con picos de voltaje que varían de $\pm 10\%$ esta respuesta no es conveniente.

Las diferencias en el funcionamiento entre el modelo y el sistema físico está en el modelo matemático ya que estos modelos solo son aproximaciones que describen el comportamiento de un sistema pudiendo o no llegar a ser exactos. Este fue el caso del sistema.

En el momento de modelar el sistema no se toman en cuenta ciertas variables que son difíciles de modelar como por ejemplo: el comportamiento dinámico del Diodo y del MOSFET, además de las incertidumbres de los valores de resistencia capacitancia e inductancia del circuito.

CONCLUSIONES PARCIALES

De una manera teórica se puede concluir que se logra obtener un modelo matemático aproximado con una estructura de un cero dos polos y una ganancia que es capaz de describir el funcionamiento un circuito convertidor elevador de voltaje además de un diseño de un controlador capaz de sobreponerse rápidamente ante cambios de voltaje y de mantener el voltaje de referencia deseado. Se comprueba que no en todos los casos un fenómeno descrito matemáticamente está totalmente apegado a la realidad debido a variaciones físicas en los parámetros de los componentes electrónicos. Por lo que en el capítulo 4 se procede a realizar una identificación del sistema con el objetivo de obtener un modelo más aproximado del circuito electrónico convertidor elevador de voltaje.

4.- IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

Para tener una idea más certera de cuál es el modelo más aproximado de la planta es necesario realizar lo que se conoce como *identificación del sistema*, para esto se pueden realizar dos tipos de pruebas.

- 1.- Respuesta del sistema en la frecuencia con una entrada sinodal.
- 2.- respuesta al escalón del sistema en lazo abierto.

4.1 RESPUESTA A UNA ENTRADA SINUSOIDAL.

Para realizar esta prueba se requiere hacer una comparación entre una señal de forma sinusoidal con una señal tipo diente de sierra y así tener una señal tipo PWM modulada. Como se muestra en la Figura 4.1. Esto debido a que el circuito convertidor elevador de voltaje no responde a señales sinusoidal.

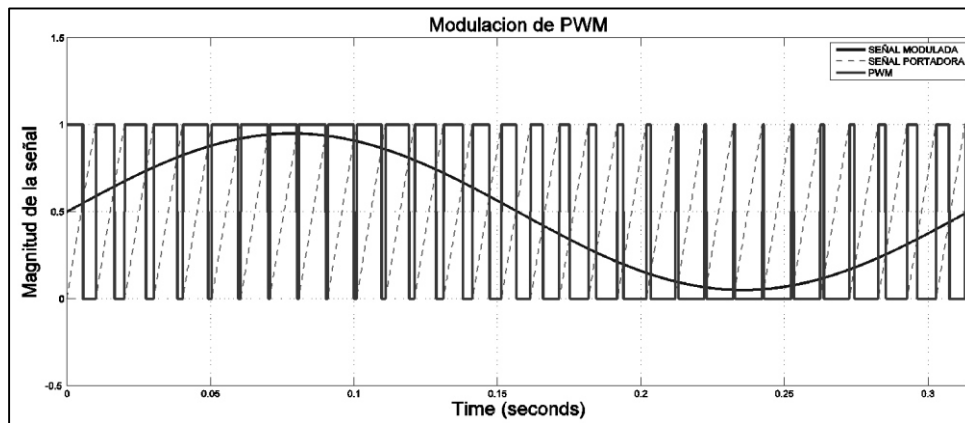


Figura 4.1 Modulación de una señal PWM en una señal senoidal.

4.2 RESPUESTA AL ESCALÓN EN LAZO ABIERTO

Este método consiste simplemente en estimular al sistema mediante una entrada escalón, para comprobar su respuesta en la salida. En la Figura 4.2 se muestra a manera de ejemplo un resultado experimental de la respuesta del circuito ante una entrada escalón.

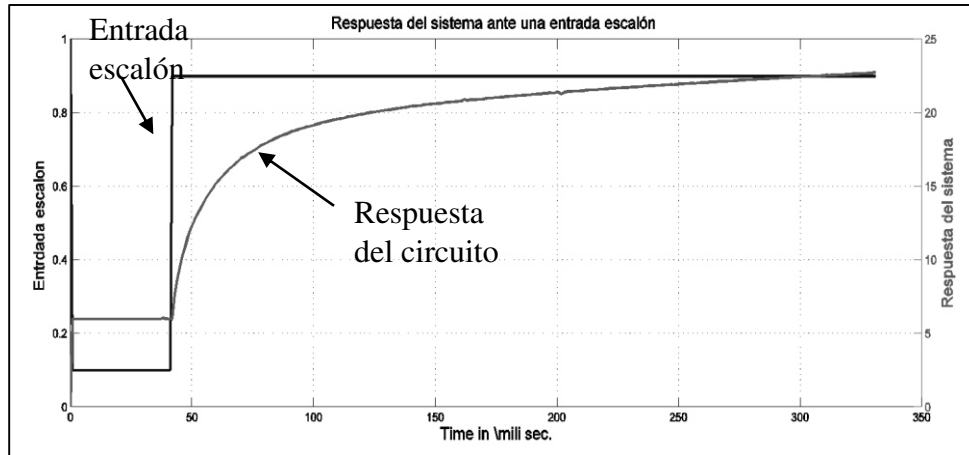


Figura 4.2 Respuesta al escalón del sistema Salida /Entrada

Para este trabajo se utiliza el método de respuesta al escalón en lazo abierto. Para obtener la función de transferencia del sistema se propuso evaluar las configuraciones mostradas en la tabla 4.1

Polos \ Ceros	0	1	2
1	$TF1 = \frac{K}{S+P}$	$TF2 = K \frac{S+Z}{S+P}$	N/A
2	$TF3 = \frac{K}{(S+P_1)(S+P_2)}$	$TF4 = K \frac{(S+Z)}{(S+P_1)(S+P_2)}$	$TF5 = K \frac{(S+Z_1)(S+Z_2)}{(S+P_1)(S+P_2)}$

Tabla 4.1 Configuraciones de funciones de transferencia Ceros/Polos

Utilizando la herramienta de simulación de Matlab Identificación de sistemas (*System Identification Tool*) como se indica en el icono de la Figura 4.3 es posible evaluar cada uno de los casos mostrados en la tabla 4.1. Esta herramienta construye modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de los datos de entrada y salida mediante algoritmos para la estimación de parámetros. El algoritmo que utiliza el programa está basado en el método de mínimos cuadrados[11]. Primeramente se importa y examina el dato medido, después se estima el modelo utilizando los datos, el modelo es estimado dentro de ciertos modelos o estructuras como las que están representadas en la Tabla 4.1 típicamente se elige el modelo que se ajuste mejor a al dato de salida.

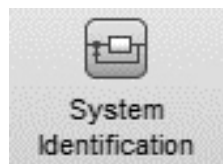


Figura 4.3 Icono de la herramienta de identificación Matlab

Para realizar la identificación del proceso se requieren los datos de entrada y de salida correspondientes a la respuesta mostrada en la figura (4.2)

4.3 IDENTIFICACIÓN A DIVERSOS NIVELES DE CARGA

Suponiendo que se desea cargar una batería con el circuito convertidor elevador de voltaje; el nivel de carga de la batería ira en aumento hasta llegar a una carga completa. Una batería se puede modelar como una resistencia y un capacitor en serie como se muestra en la Figura 4.4. Esto representa la parte resistiva y capacitiva respectivamente [10]. La corriente que pasa a través, de la batería varía de acuerdo a la ley de OHM

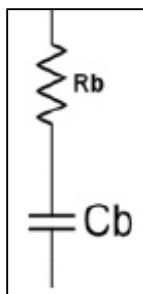


Figura 4.4 Modelo de una batería

La corriente de salida del circuito es inversamente proporcional a la carga R , esto quiere decir que a menor nivel de carga mayor será la corriente de salida. Regresando al ejemplo, una batería con carga mínima, tendría una resistencia de 250Ω , a media carga tendrá 333Ω , a $\frac{3}{4}$ de carga tendrá una resistencia de 500Ω y con carga completa alcanzará $1\text{ K}\Omega$.

Hasta este momento el circuito se ha probado con una resistencia de carga de $1\text{ k}\Omega$. Simulando una condición en la que no se requiere tanta corriente, por lo tanto, se podría decir que se cuenta con una batería cargada casi en su totalidad.

Estas condiciones cambiantes de carga afectan directamente al circuito haciendo que sea más lento en llegar al valor deseado en condiciones de lazo cerrado. Por lo que se considera necesario identificar el modelo del sistema para cada uno de las condiciones de carga.

Del ejemplo anterior se toman los valores de carga de 250Ω , 333Ω , 500Ω y 1000Ω . Para la implementación de estas resistencias en el circuito, se considera que la corriente aumenta conforme aumenta el ancho de pulso por lo que se utilizan resistencias de potencia con valor de 2 watts.

El siguiente paso es realizar cuatro experimentos uno por cada valor de carga comenzando por el valor más alto en este caso 1000Ω . En estos experimentos se obtendrá la respuesta del circuito ante una entrada escalón unitario de cada uno de los niveles de carga del circuito.

Este experimento consiste en incrementar el ancho de pulso de un 10% hasta un 90% y graficar el tiempo que le toma al circuito en llegar a su valor estacionario de voltaje en la Figura 4.5 se muestra el resultado obtenido en experimento.

Para ver la interfaz gráfica del programa en LabVIEW ver el APENDICE en el apartado 5

Experimento1. Para una carga de $1000\ \Omega$ a 2W

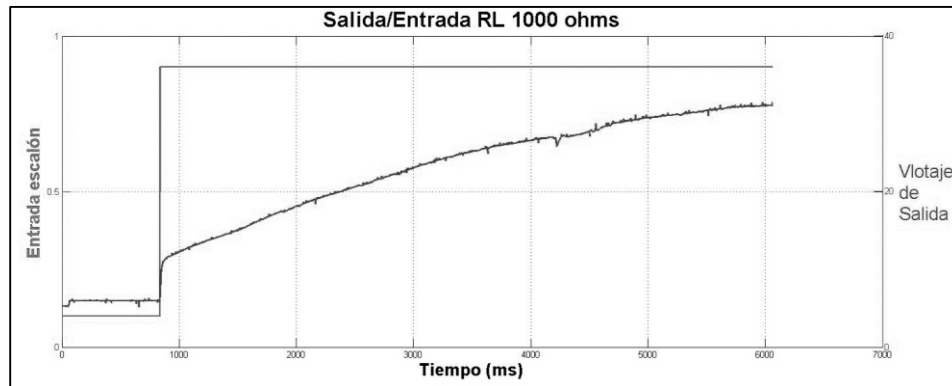


Figura 4.5 Respuesta ante una entrada escalón con una resistencia de 1000Ω a 2W

Una vez que se evalúan todas las configuraciones de las funciones de transferencia se procede a comparar cada una de estas configuraciones.

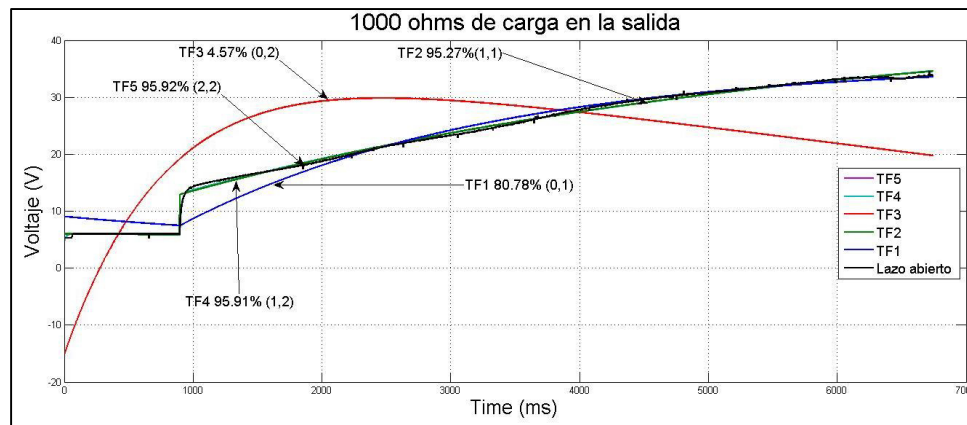


Figura 4.6 Porcentajes de aproximación para las diferentes configuraciones

Como se puede observar en la Figura 4.6 algunas de las configuraciones no son capaces de seguir la respuesta dinámica del circuito, solo las configuraciones TF2, TF4, TF5 son las más aproximadas a esta dinámica por lo que se descartan las configuraciones dadas por TF1 y TF3

Ahora se observa en la Figura 4.7 el diagrama de Bode de las funciones de transferencia restantes (TF2, TF4, TF5).

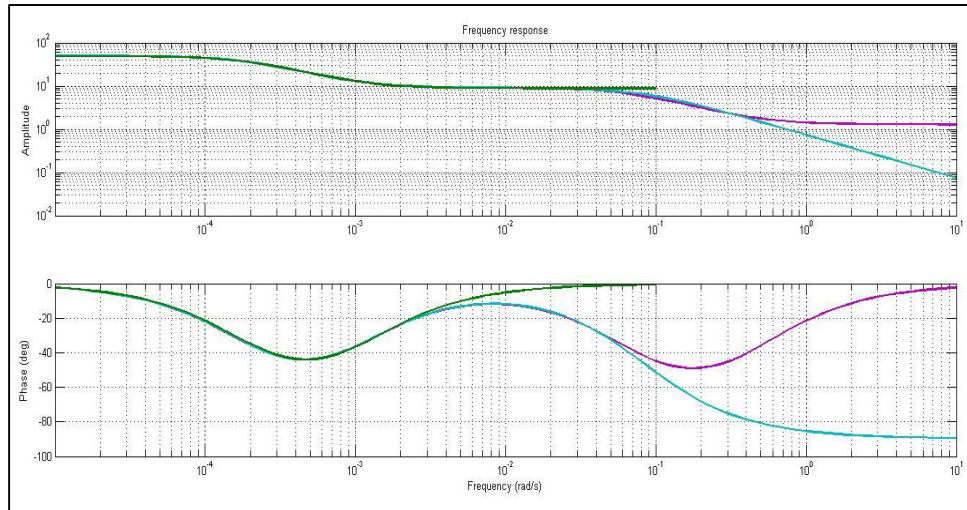


Figura 4.7 Bode de las funciones TF2, TF4 y TF5

Ahora por observación se descarta TF2 Y TF5 debido a que su ganancia no cruza por cero

Queda como resultado que la función de transferencia que más se aproxima a la respuesta del sistema es dada por la función de transferencia TF4. La figura 4.8 muestra el diagrama de Bode de TF4

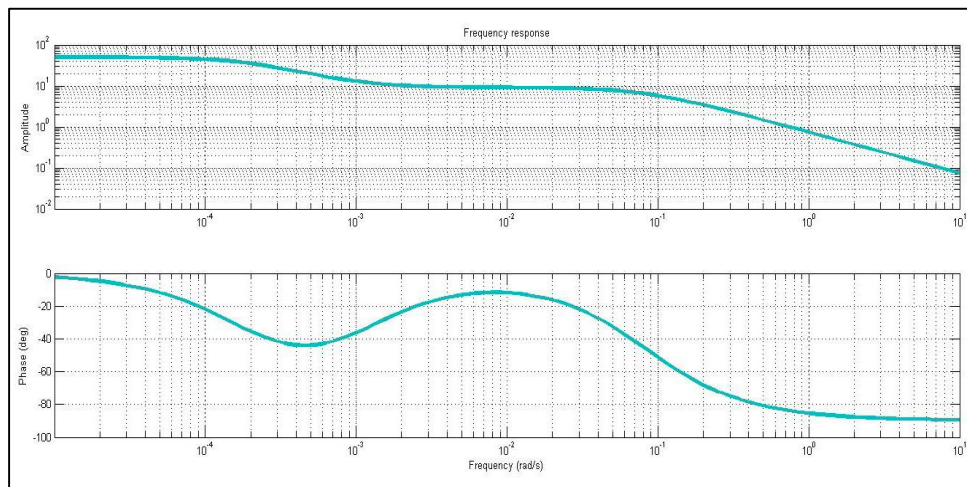


Figura 4.8 Bode de la función TF4

Se observa que una vez más la configuración 1 cero y 2 polos es la más aproximada al proceso real del circuito al igual que la función de transferencia obtenida en el capítulo 3 en la ecuación (3-32)

Para este primer experimento se concluye que la función de transferencia es la siguiente.

$$TF4_{1000}(s) = \frac{0.74285(s + 0.001054)}{(s + 0.08143)(s + 0.0001925)} \quad (4-1)$$

$$= \frac{0.7429s + .0007828}{s^2 + .08162s + 1.567 * 10^{-5}}$$

Experimento 2

Para una carga de 500ohms

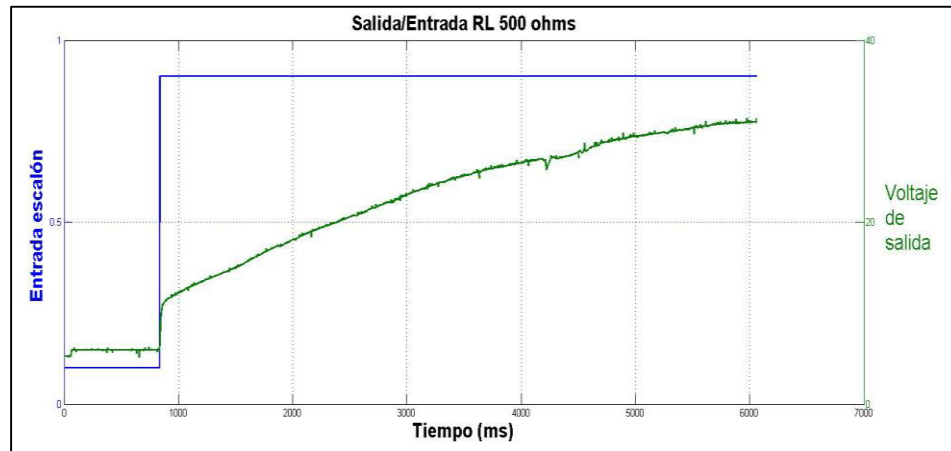


Figura 4.9 Respuesta ante una entrada escalón

En la gráfica 4.9 se puede observar el la respuesta ante una entrada escalón a un nivel de carga de 500Ω

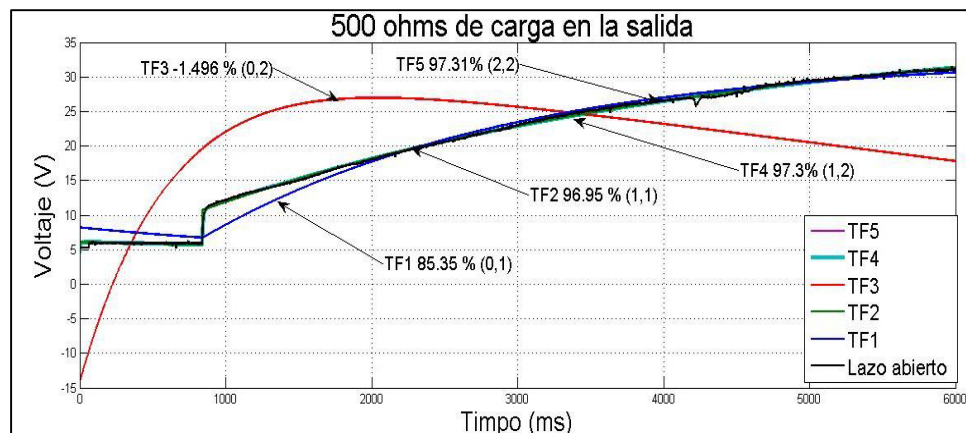


Figura 4.10 Porcentajes de aproximación de las diferentes configuraciones

Como es posible observar en la Figura 4.10 las configuraciones TF1 y TF3 son las que menos se aproximan a la respuesta al escalón por lo que serán descartadas. En cambio las configuraciones TF2, TF4 y TF5 son más aproximadas.

La Figura 4.11 muestra el diagrama de Bode de las configuraciones TF2, TF4 y TF5, aquí podemos ver como en las configuraciones TF2 y TF5 el margen de ganancia no cruzan por

cero, lo cual nos deja como resultado que la función de transferencia que más se aproxima a la respuesta original es TF4

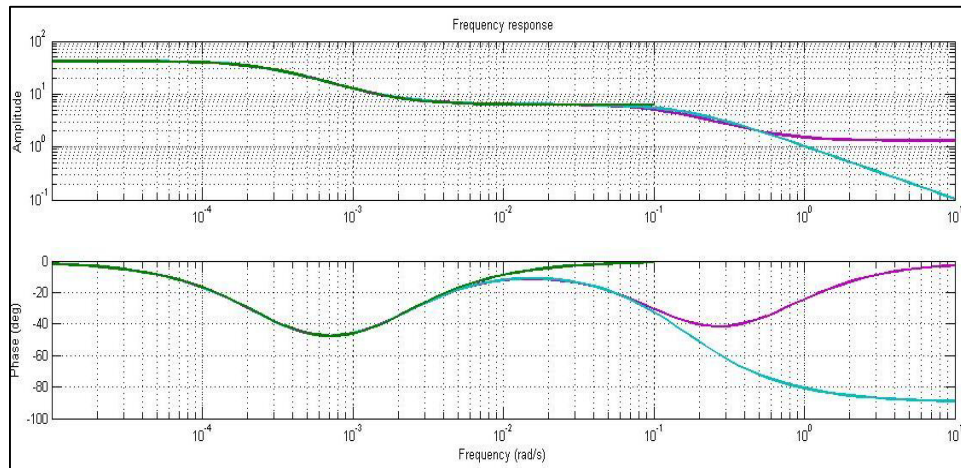


Figura 4.11 Bode de las funciones TF2, TF4, TF5

En la Figura 4.12 se observa el diagrama de bode de TF4.

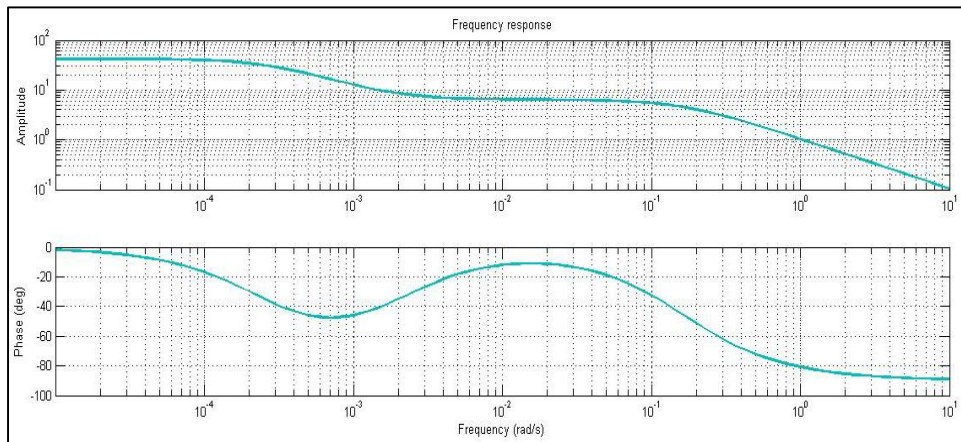


Figura 4.12 Bode de la función TF4

La función de transferencia para el sistema con una carga de $500 \, \Omega$ es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 TF4_{500} &= \frac{1.0404(s + 0.001799)}{(s + 0.1623)(s + 0.0002738)} \\
 &= \frac{1.04s + .001872}{s^2 + .1626s + 4.444 * 10^{-05}}
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

Se observa que la función de transferencia obtenida coincide una vez más con el modelo matemático original visto en el capítulo 3

Experimento 3

Para una carga de 333ohms

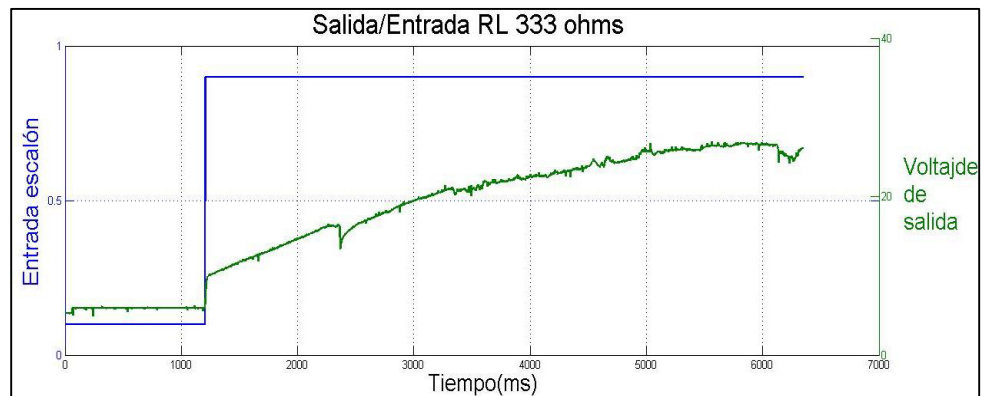


Figura 4.13 Respuesta del sistema ante una entrada escalón

En la figura 4.13 se observa la respuesta el circuito ante una entrada escalón el siguiente paso es comparar cada una de las configuraciones vistas en la Tabla 4.1

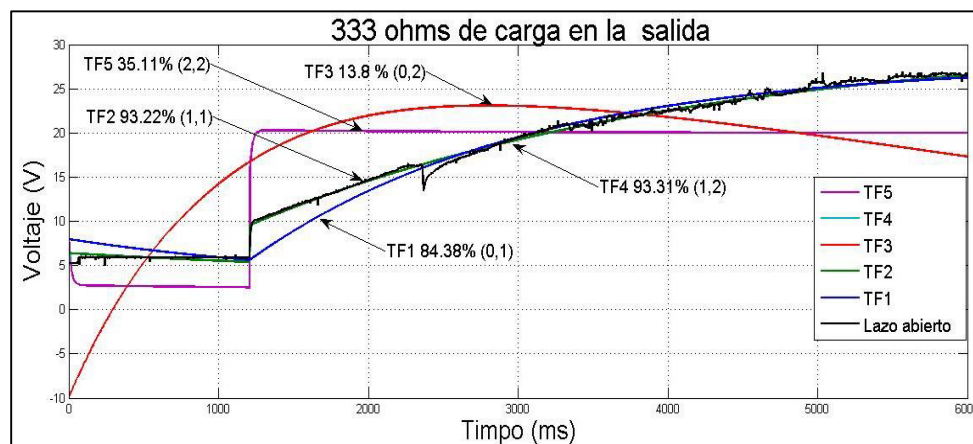


Figura 4.14 Porcentajes de aproximación de las diferentes configuraciones

Se descartan las configuraciones TF5 y TF3 debido a que estas configuraciones no se aproximan a la respuesta obtenida en lazo abierto como se muestra en la figura 4.14 .El siguiente paso es establecer el diagrama de Bode de las configuraciones TF1, TF2 y TF4

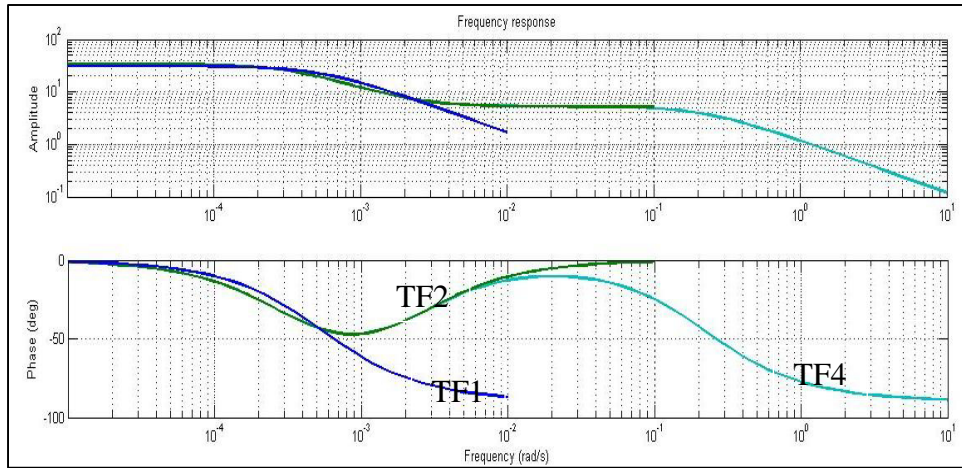


Figura 4.15 Diagramas de Bode de las configuraciones TF1, TF2, TF4

Como se muestra en la Figura 4.14 en las configuraciones TF1 y TF2 no cruzan por cero por lo que se decide descartarlas en la Figura 4.16 se muestra el diagrama de Bode de TF4

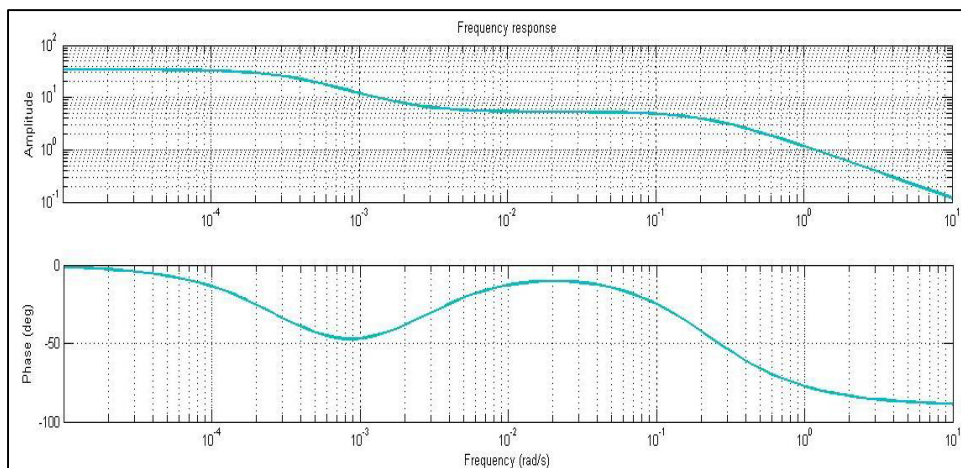


Figura 4.16 Diagrama de Bode de la función TF4

La función de transferencia para una carga de 333 ohm es de un cero dos polos al igual que el modelo encontrado en el capítulo 3

$$\begin{aligned}
 TF4_{333} &= \frac{1.191(s + 0.002192)}{(s + 0.2249)(s + 0.0003403)} \\
 &= \frac{1.191s + .00261}{s^2 + .2253s + 7.654 * 10^{-05}}
 \end{aligned}
 \tag{4-3}$$

Experimento 4

Por último se analiza una carga de 250 Ω . en la Figura 4.17 se muestra como es la respuesta del circuito bajo este nivel de carga

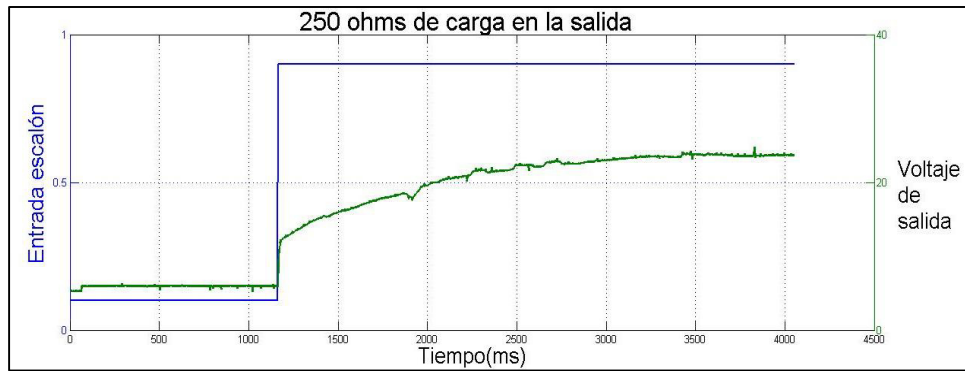


Figura 4.17 Respuesta del sistema ante una entrada escalón

El siguiente paso es comparar las diferentes configuraciones vistas en la Tabla 4.1. La Figura 4.18 muestra que las configuraciones TF1 y TF3 son las que tienen un menor seguimiento a la referencia por lo que se decide descartarlas.

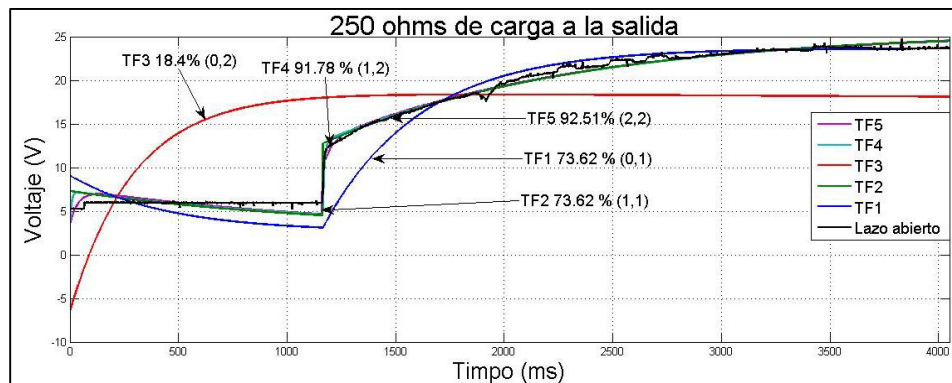


Figura 4.18 Porcentaje de aproximación de las diferentes configuraciones.

A continuación se muestra en la Figura 4.19 los diagramas de Bode de las configuraciones TF2, TF4 y TF5. En este diagrama de Bode es posible observar que el margen de ganancia de TF2 y TF5 no cruza por cero por lo que se decide descartar estas configuraciones.

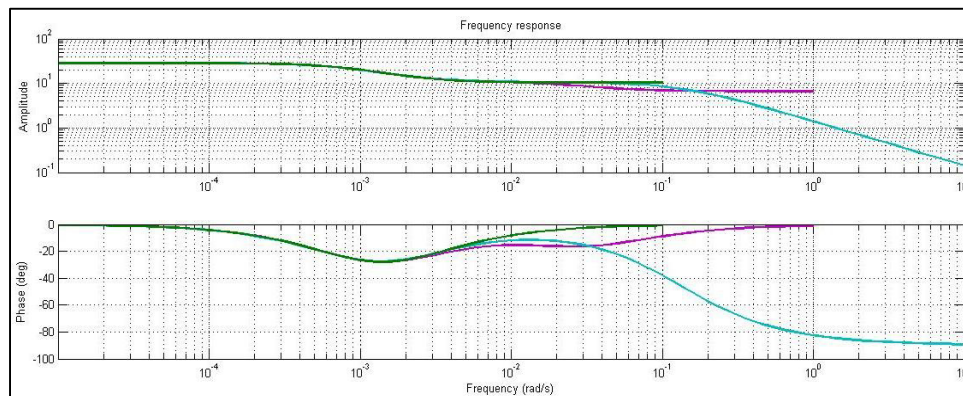


Figura 4.19 Diagramas de Bode de las Funciones (TF2, TF4 y TF5)

La función de transferencia para una carga de 250 ohm es de un cero dos polos

$$TF_{4_{250}} = \frac{1.4066(s + 0.002191)}{(s + 0.132)(s + 0.000816)} = \frac{1.407s + .003082}{s^2 + .1328s + .0001077} \quad (4-4)$$

4.4 DISEÑO DE CONTROL A DIVERSOS NIVELES DE CARGA.

Una vez obtenidas las 4 funciones de transferencia del sistema se procede al diseño del controlador.

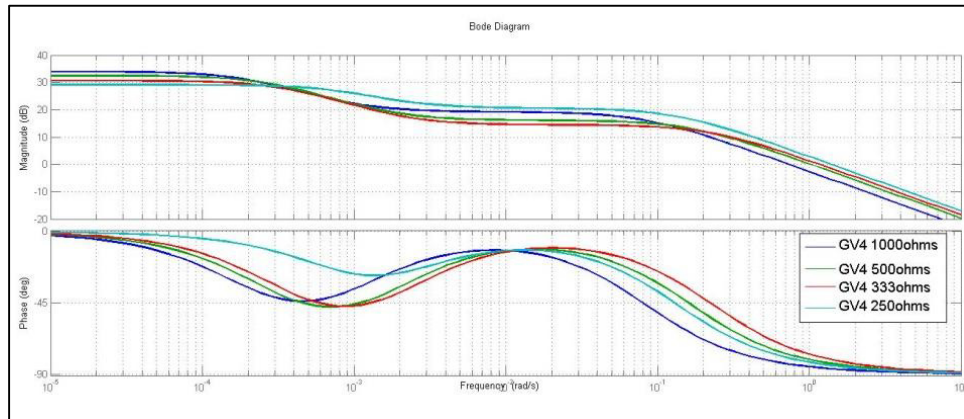


Figura 4.20 Bode de las funciones de transferencia del sistema

Para comenzar se propone el siguiente controlador

$$C5(s) = \frac{3.162(s + 5)}{s + 0.0519} = \frac{3.162s + 15.81}{s + 0.0519} \quad (4-5)$$

Se multiplica al controlador C5(S) por las funciones de transferencia GV1, GV2, GV3, GV4.

Obteniendo el siguiente resultado en Bode.

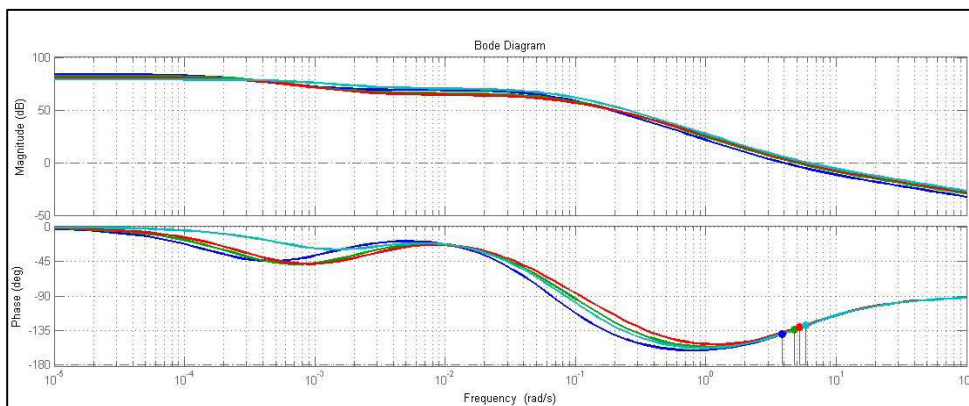


Figura 4.21 Diagrama de bode de las funciones de transferencia con C5(s)

A continuación se muestra la respuesta al escalón

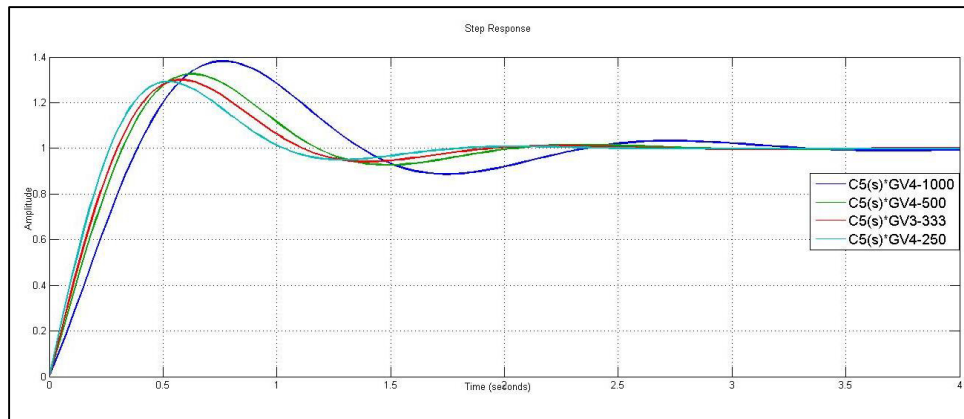


Figura 4.22 Respuesta al escalón en lazo cerrado del sistema implementando C5(s)

Como se puede observar el comportamiento del sistema en lazo tiene una respuesta aceptable, a pesar de eso aún posible mejorar algunas características, por ejemplo el tiempo de establecimiento que es de 4 segundos y el sobrepaso del transitorio que es alrededor del 40%.

Proponiendo un segundo controlador.

$$C6(s) = \frac{100}{s + 10} \quad (4-6)$$

A continuación se puede observar el diagrama de con el controlador C6(s) implementado.

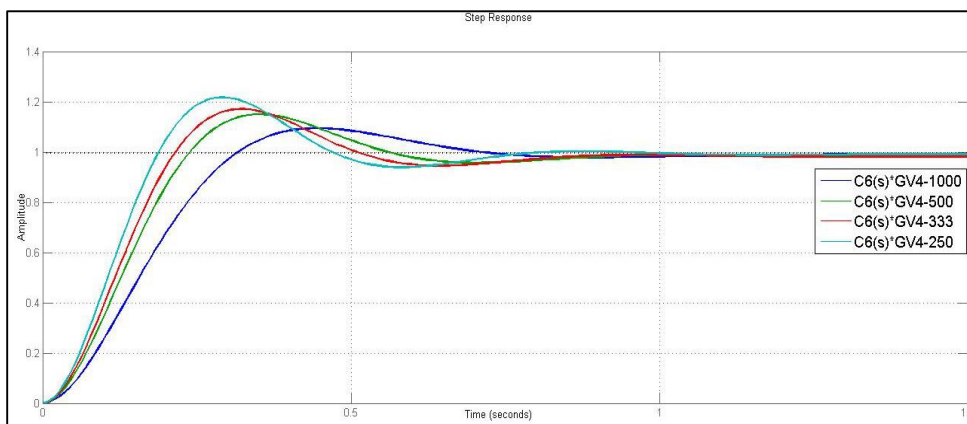


Figura 4.23 Respuesta al escalón del sistema implementando C6(s).

Como se puede observar el comportamiento del sistema en lazo cerrado es aparentemente adecuado pero aún tiene cosas que es posible mejorar por ejemplo:

El tiempo de establecimiento que es de 1.5 segundos y el sobrepaso del transitorio que es alrededor del 20%.

Se propone un nuevo controlador.

$$C7(s) = \frac{210s + 105}{s^2 + 15s} \quad (4-7)$$

A continuación se presenta el resultado en Bode.

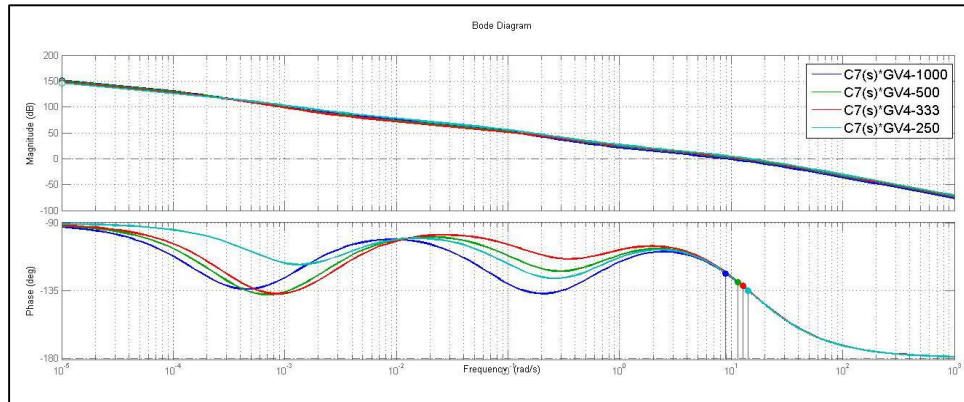


Figura 4.24 Diagrama de Bode del sistema implementando C7(s)

A continuación se presenta la respuesta al escalón en lazo cerrado

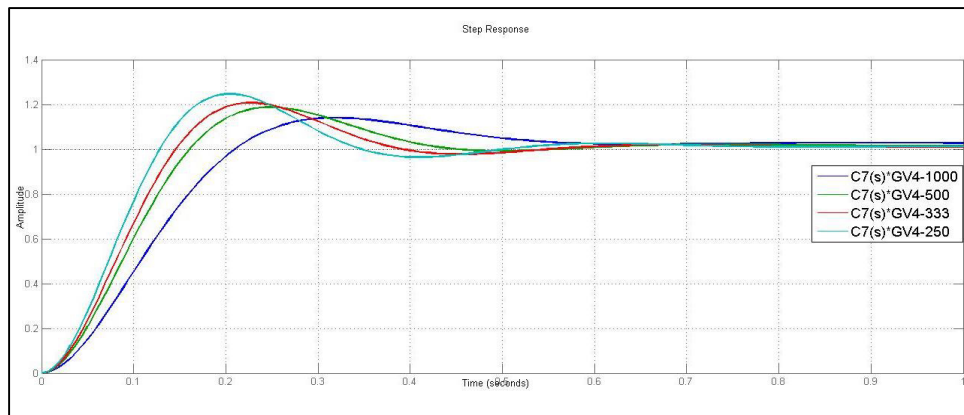


Figura 4.25 Respuesta al escalón implementando C6(s)

Como se puede observar el comportamiento del sistema en lazo cerrado podría utilizarse, sin embargo, aún tiene características que es posible mejorar por ejemplo el tiempo de establecimiento que es de 0.7s segundos y el sobrepaso del transitorio que es alrededor del 20% .

Por lo que propondremos un nuevo controlador.

$$C8(s) = \frac{100s + 30}{s^2 + 10s} \quad (4-8)$$

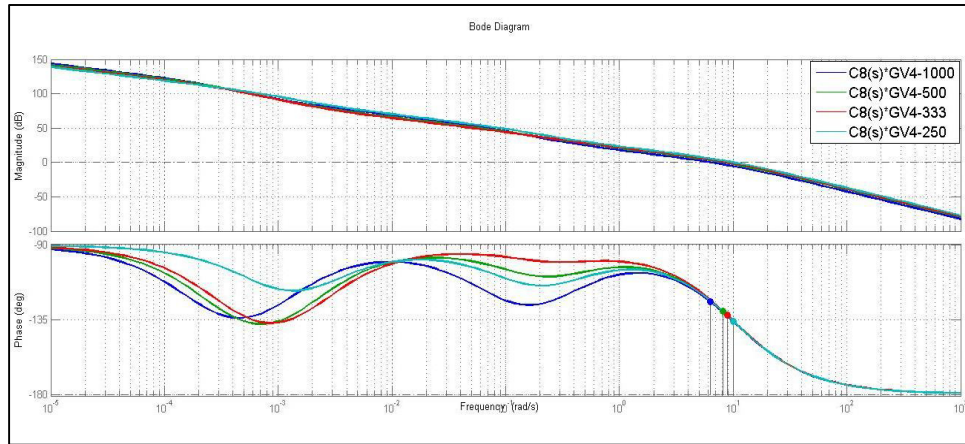


Figura 4.26 Diagrama de Bode del sistema implementando C8(s)

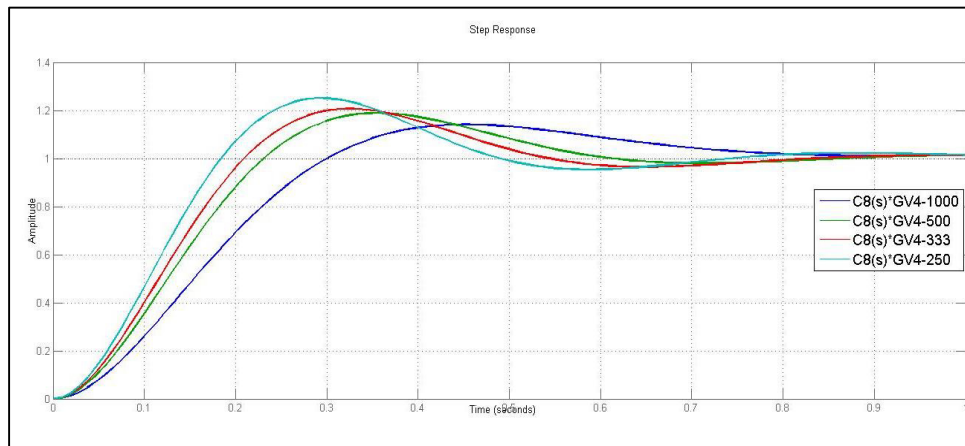


Figura 4.27 Respuesta al escalón implementando C8(s)

El comportamiento del sistema en lazo cerrado parece cumplir con las especificaciones de diseño. El tiempo de establecimiento es de 0.7 segundos y el sobrepaso del transitorio que es alrededor del 20%.

4.5 CONTROL A DIFERENTES NIVELES DE CARGA

Pruebas en laboratorio (banco de prueba)

Una vez definido el tipo de control, que teóricamente, es capaz de sobreponerse a los cuatro niveles de carga, se procede a una implementación en LabVIEW

Para estos experimentos se utiliza el controlador C8(s), debido a que su comportamiento con respecto a C7(s) es prácticamente similar.

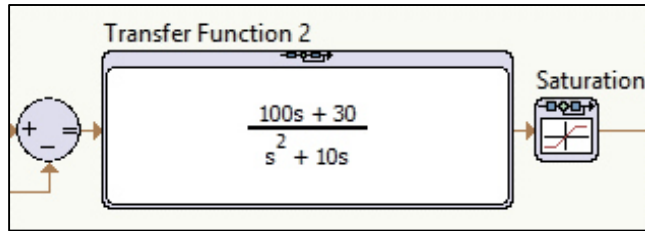


Figura 4.28 Implementación del control $C8(s)$ en LabVIEW

Para este experimento se pone a prueba el controlador comparando el comportamiento en lazo cerrado con el comportamiento en lazo abierto.

En este experimento se mantiene un valor de carga de 250 Ohms, debido a que su tiempo en el transitorio es muy alto.

La primera parte de este experimento consiste en conocer el comportamiento del sistema en lazo abierto. Para esto, se alimenta el circuito con un voltaje de entrada, V_{in} , de 5V de CD, lo siguiente será iniciar el programa de pruebas en lazo abierto, con un ancho de pulso del 10 %, se aumenta gradualmente el valor de ancho de pulso hasta obtener cada valor de voltaje deseado. Estos voltajes deseados adquieren valores que van desde los 5V a los 10V.

Estos valores específicos de ancho de pulso se muestran en la tabla 4.2

3936 Hz	$5V_{in}$
10 %	4.8V
14%	5V
27%	6V
37%	7V
44%	8V
50%	9V
56%	10V

Tabla 4.2 Valores específicos de ancho pulso en lazo abierto

Posteriormente se realiza la misma prueba en lazo cerrado para los tres casos, pero ahora el cambio será en el valor de referencia del voltaje deseado en la salida. Iniciando el programa con un valor deseado en la salida de 5V y llevándolo a los valores deseados de 6, 8, 10 V.

En la Figura 4.28 se muestran los resultados obtenidos en la primera prueba.

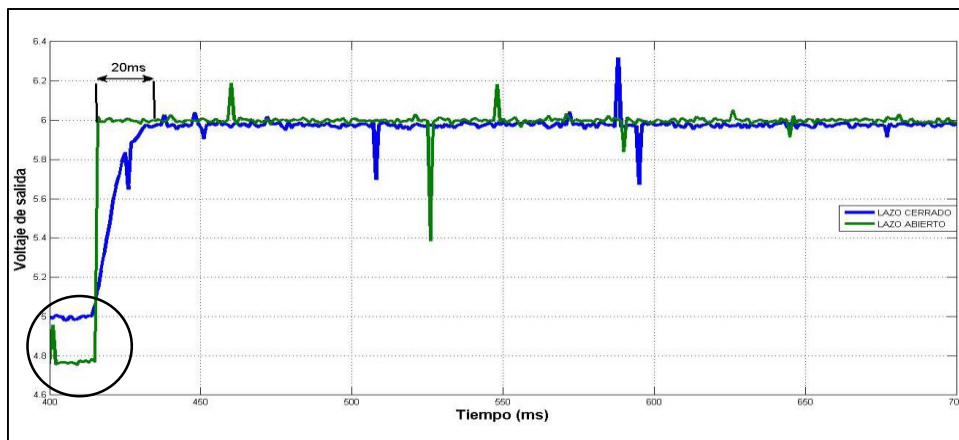


Figura 4.29 Comparación del lazo abierto y lazo cerrado a 6 V de salida

Como se puede observar en la Figura 4.28 el voltaje inicial en lazo abierto y en lazo cerrado es diferente, debido a que la prueba en lazo cerrado se le indica al programa el voltaje en el que se desea comenzar en este caso 5V con un ancho de pulso del 14% como se indica en la Tabla 4.2.

En cambio en lazo abierto, se le indica al programa el ancho de pulso con el que se desea comenzar en este caso con un 10% dando como resultado un voltaje de entrada de aproximadamente 4.8V debido a que a valores menores del 14% de ancho de pulso el circuito tiende reducir el valor de voltaje suministrado.

Ahora bien, una vez aclarado este punto, se analiza el resultado obtenido en la gráfica.

Se obtiene un voltaje de salida muy parecido tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. Sin embargo, es posible apreciar que la respuesta en lazo cerrado tiene una respuesta en el transitorio de aproximadamente 20ms.

La Figura 4.29 presenta los datos obtenidos para un voltaje de referencia de 8V.

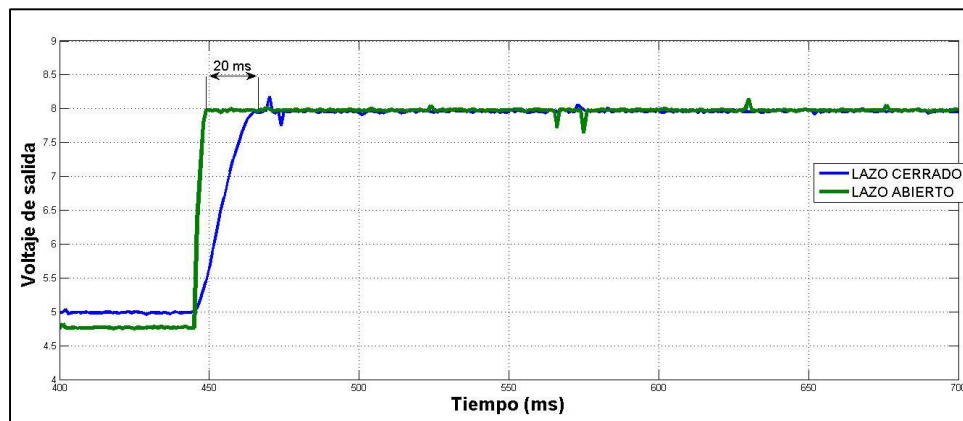


Figura 4.30 Lazo abierto vs lazo cerrado a 8V de referencia

En este experimento se observa que el sistema en lazo cerrado responde de manera bastante aceptable, y al igual que en el experimento anterior el retraso transitorio es aproximadamente de 20ms

Ahora se presenta en la Figura 3.30 el resultado de la comparación a un voltaje de referencia de 10 V

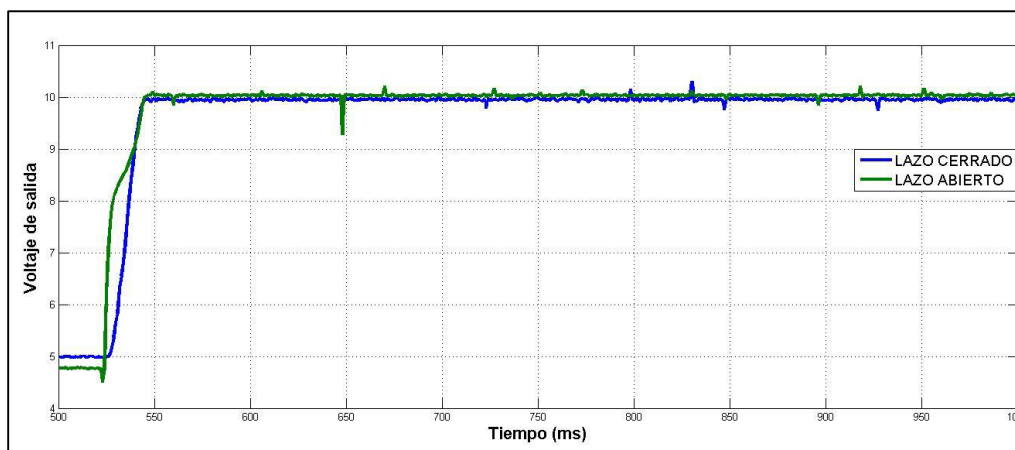


Figura 4.31 Lazo abierto y lazo cerrado a 10V de referencia

En esta última prueba también demuestra resultados satisfactorios. En los que se demuestra una vez más, que el controlador es capaz de seguir el voltaje de referencia casi en su totalidad, en este caso a un valor de 10V.

A continuación se presenta en la Figura 4.31 una comparativa con los resultados obtenidos en los tres experimentos

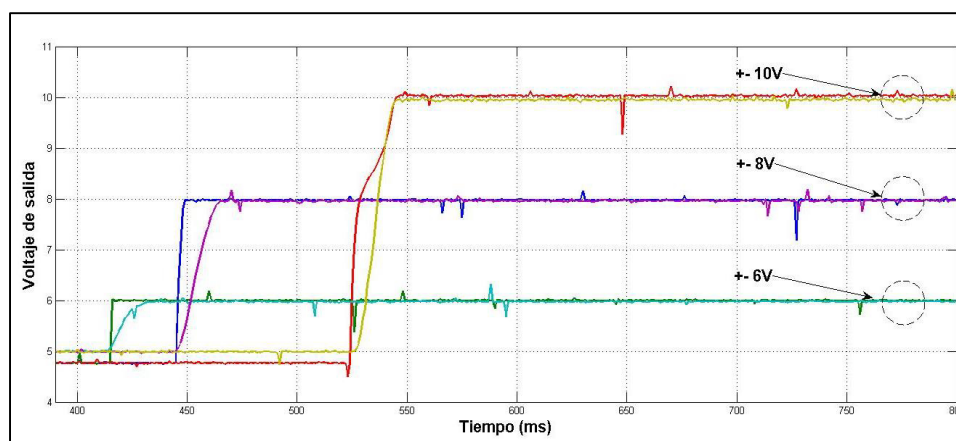


Figura 4.32 Comparación de los tres experimentos

Hasta este momento se concluye que el sistema en lazo cerrado implementando el controlador C8(s), es capaz de llevar el voltaje deseado, en un tiempo relativamente corto, aproximadamente 20ms, a un valor deseado.

Ahora bien una vez que se demuestra que el circuito es capaz de seguir el voltaje que se desea en la salida. Lo siguiente es comprobar, como es la respuesta ante una perturbación.

Para esto, se repite el experimento descrito en la sección 4.7, con la diferencia de que se simula una perturbación escalón en la alimentación del circuito, simulando condiciones de aumento y disminución de voltaje. Esto se logra subiendo y bajando el voltaje en la fuente de alimentación.

En las siguientes figuras podrá notarse que en algunas gráficas la perturbación que actúa en lazo abierto no coincide en el tiempo con la perturbación en lazo cerrado. Esto se debe a que primero se trabajó con el lazo abierto y después se trabajó con el lazo cerrado, para posteriormente unir las dos gráficas con fines demostrativos.

Lo que se busca demostrar en estas gráficas es la diferencia que existe, entre cómo responde el sistema en lazo abierto y el lazo cerrado ante una perturbación.

A continuación se presenta el resultado de las primeras pruebas

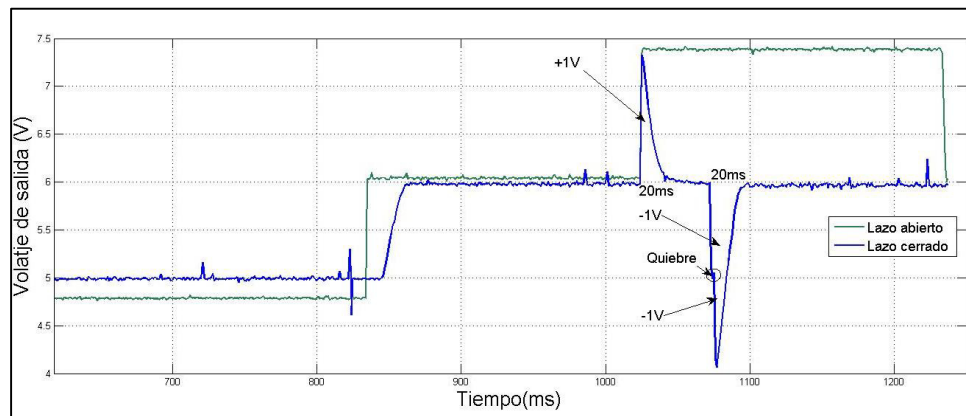


Figura 4.33 Comparación de respuesta ante perturbaciones LA y LC

En esta prueba se simulan condiciones de perturbación en las que el voltaje de entrada aumenta 1V y disminuye en 1y 2V (Lazo cerrado). Como se muestra en la Figura 4.32 en el primer pico ocurre un aumento de voltaje de un volt y en el segundo pico una caída de voltaje de 2V

Es posible apreciar que el tiempo en el que el voltaje se recupera después de la perturbación es de 20ms. A diferencia del lazo abierto que no regresa al valor de voltaje deseado.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas en 8 y 10 V de referencia.

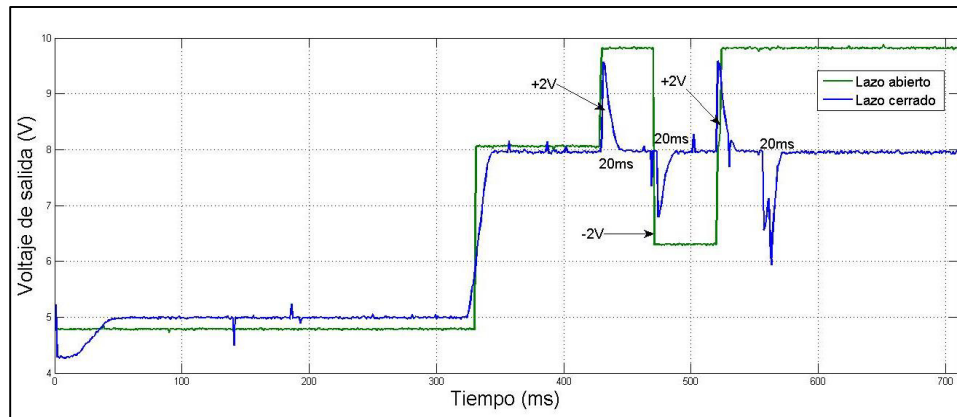


Figura 4.34 Comparación de respuestas ante perturbaciones LA y LC

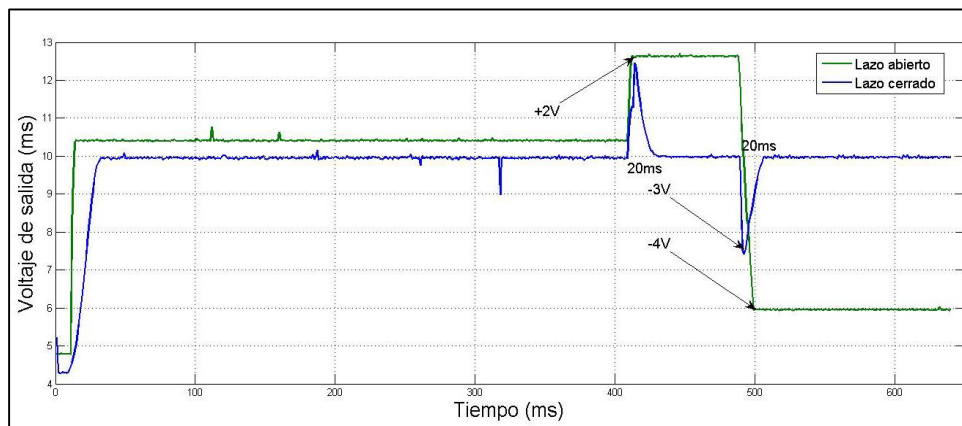


Figura 4.35 Comparación de respuesta de LA y LC ante perturbaciones

Conclusiones parciales

Se concluye que es posible tener un controlador para el circuito convertidor elevador de voltaje capaz de sobreponerse a fuertes perturbaciones en el voltaje suministrado por la fuente. Esto da pie a que es posible realizar pruebas de estabilidad del circuito bajo condiciones de voltaje variable.

5.- PRUEBAS EN TÚNEL DE VIENTO

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL TUNEL DE VIENTO

El primer paso para la realizar estas pruebas es la caracterización del túnel de viento. Se comprueba la frecuencia en la que trabaja el variador de velocidad del motor que impulsa el túnel de viento contra la velocidad del viento que genera. Esta frecuencia en el variador de velocidad del motor en el túnel de viento sirve como referencia para hacer las mediciones de velocidad de viento que se alcanza en el túnel. A continuación se presentan los resultados en la Tabla 5.1

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)
1	0,5	14	13
2	1,5	15	13,8
3	2,6	16	14,9
4	3,5	17	15,8
5	4,4	18	16,8
6	5,1	19	17,8
7	6,3	20	18,8
8	7,2	21	19,7
9	8,1	22	20,8
10	9,1	23	21,8
11	10,2	24	22,8
12	11,2	25	23,8
13	12,1		

Tabla 5.1 Frecuencia del motor del túnel con Velocidad del viento

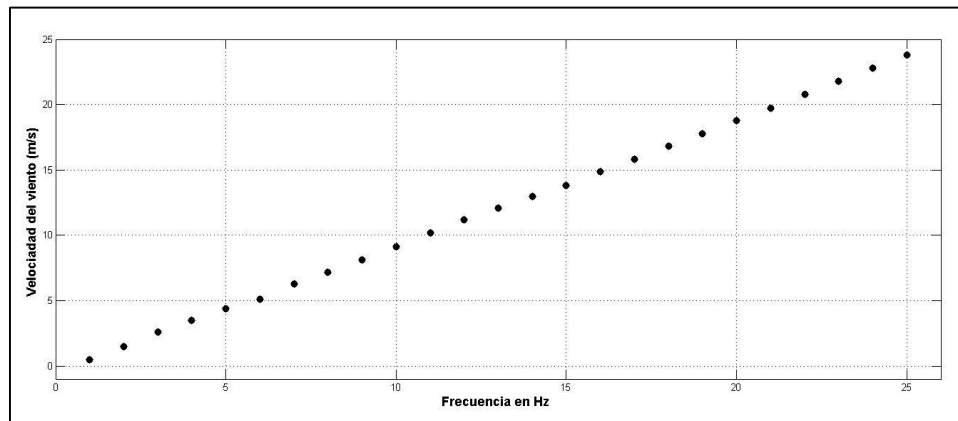


Figura 5.1 Relación lineal entre frecuencia y velocidad de viento en el túnel

En la Figura 5.1 se muestra la relación lineal que existe entre la frecuencia la que trabaja el motor del túnel y el viento generado en el mismo.

5.2 EXPERIMENTACIÓN EN TÚNEL DE VIENTO

Una vez que se conoce esta relación, se realizan las pruebas con la velocidad del viento como referencia.

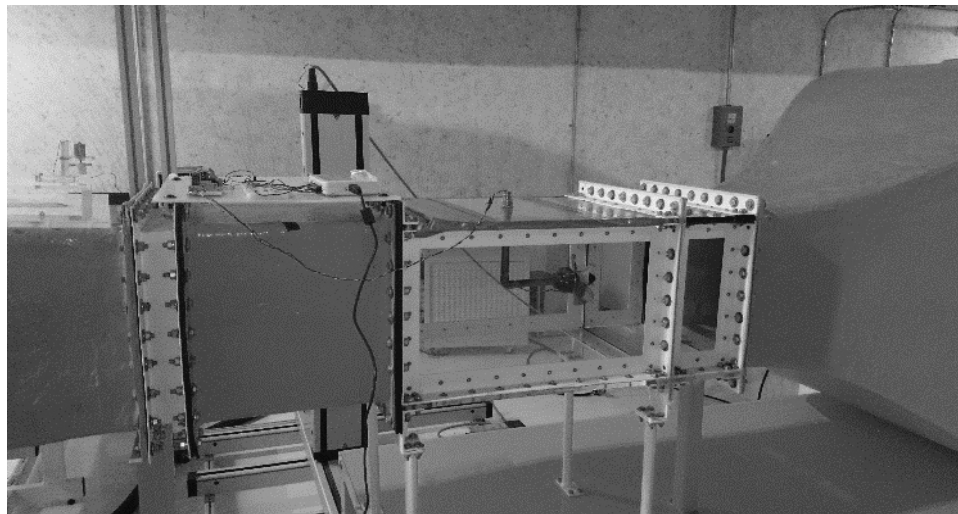


Figura 5.2 Pruebas en túnel de viento

Antes de comenzar el experimento en el túnel de viento, en la Figura 5.3 se muestra el esquema del sistema a implementar.

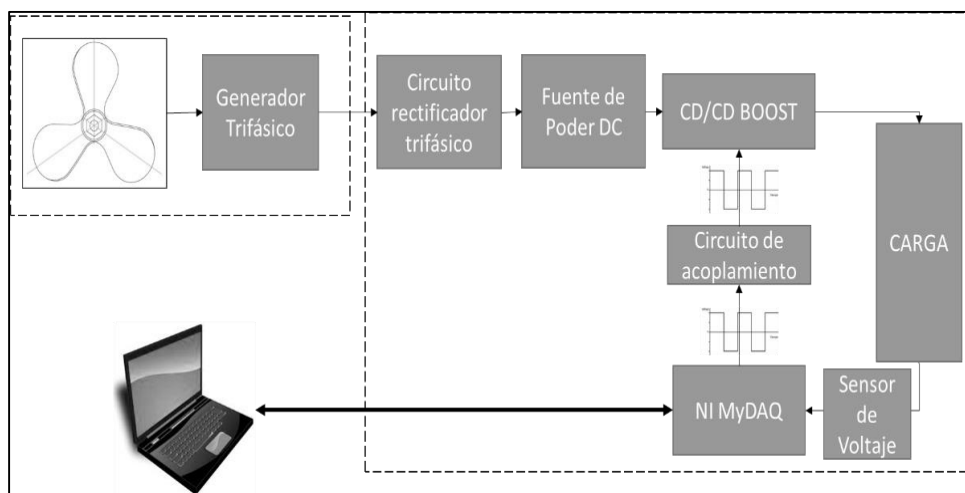


Figura 5.3 Esquema del sistema implementado en el túnel de viento

El siguiente paso es obtener una relación entre la velocidad del viento y el voltaje en el generador a continuación se muestran los resultados obtenidos.

Velocidad m/s	Voltaje Generador (V)	Velocidad m/s	Voltaje Generador (V)
0,5	0	13	2,8
1,5	0	13,8	3,16
2,6	0	14,9	3,46
3,5	0	15,8	3,85
4,4	0	16,8	4,2
5,1	0	17,8	4,52
6,3	0,45	18,8	4,9
7,2	0,67	19,7	5,27
8,1	1	20,8	5,63
9,1	1,35	21,8	6
10,2	1,7	22,8	6,3
11,2	2,06	23,8	6,7
12,1	2,45		

Tabla 5.2 Relación voltaje del generador y la velocidad del viento en el túnel

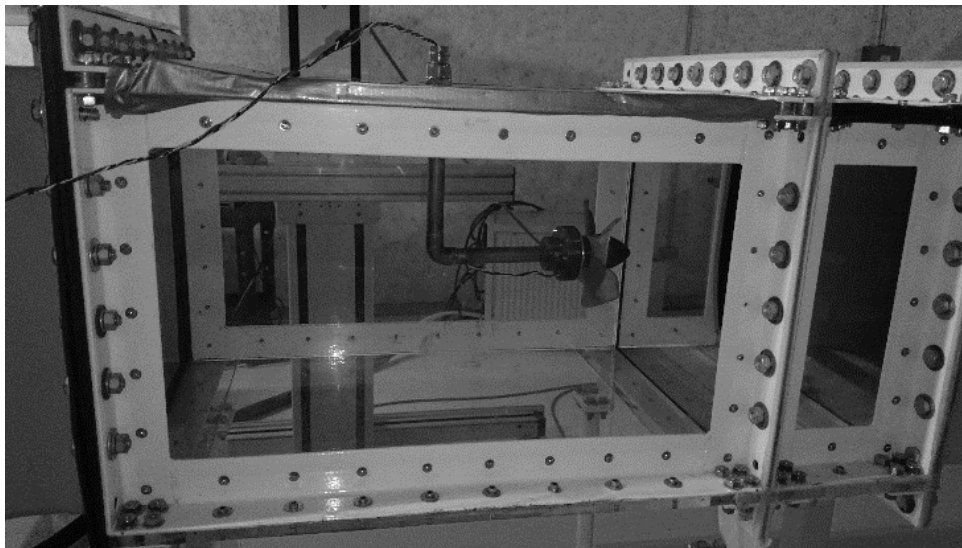


Figura 5.4 Generador en túnel de viento

La Figura 5.5 muestra de forma gráfica los resultados obtenidos.

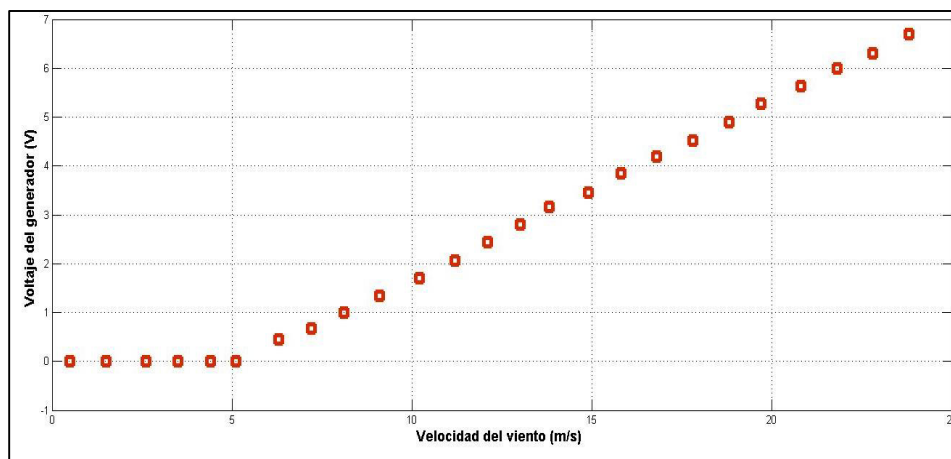


Figura 5.5 Relación de la velocidad del viento y el voltaje del generador

Es posible apreciar que en los valores comprendidos entre 0m/s y 7m/s no es posible generar voltaje. En cambio a velocidades a partir de los 8m/s, se puede apreciar que es posible generar 1V, el cual es suficiente para que el circuito y su sistema de control comiencen a ser operativos.

Debido a que el generador elegido (con que se cuenta) es de baja potencia, es importante considerar los límites en los que puede operar el circuito, estos límites se incrementan conforme la velocidad del viento aumenta. La cuantificación se muestra en la Tabla 5.3 y en la Figura 5.6.

Velocidad m/s	Voltaje Mínimo	Voltaje Máximo	Velocidad m/s	Voltaje Mínimo	Voltaje Máximo
6,3	1	1,5	15,8	4	10
7,2	1	2	16,8	5	11
8,1	1	3,5	17,8	5	11
9,1	2	4,5	18,8	5	12
10,2	2	5,5	19,7	6	12
11,2	2	6,5	20,8	6	12
12,1	3	7,5	21,8	7	12
13	3	8,5	22,8	7	12
13,8	4	9	23,8	7	13,07
14,9	4	10			

Tabla 5.3 Voltajes mínimos y máximos respecto a la velocidad del viento

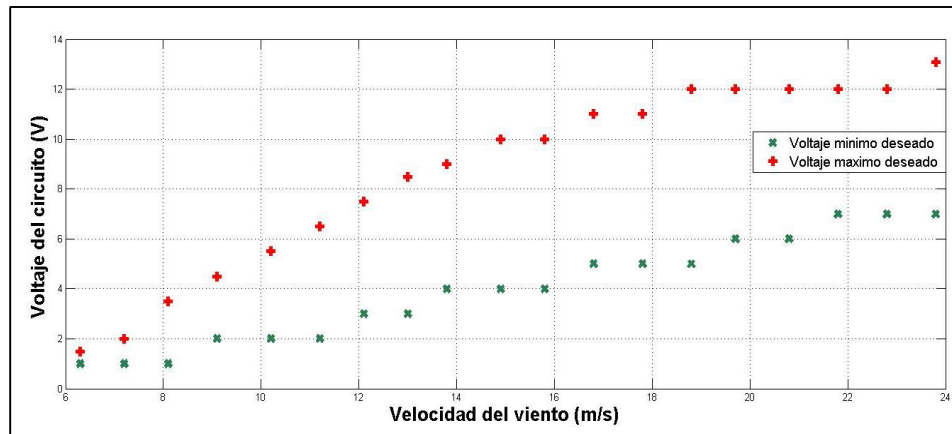


Figura 5.6 Relación voltajes mínimos y máximos con respecto a la velocidad del viento

La figura 5.6 indica el voltaje mínimo obtenido y el voltaje máximo que es posible demandar al circuito en función de la velocidad del viento.

El siguiente paso es demostrar la relación existente entre el voltaje deseado en la salida y el voltaje en la entrada. En las Figuras 5.7 y 5.8 se muestran los resultados obtenidos.

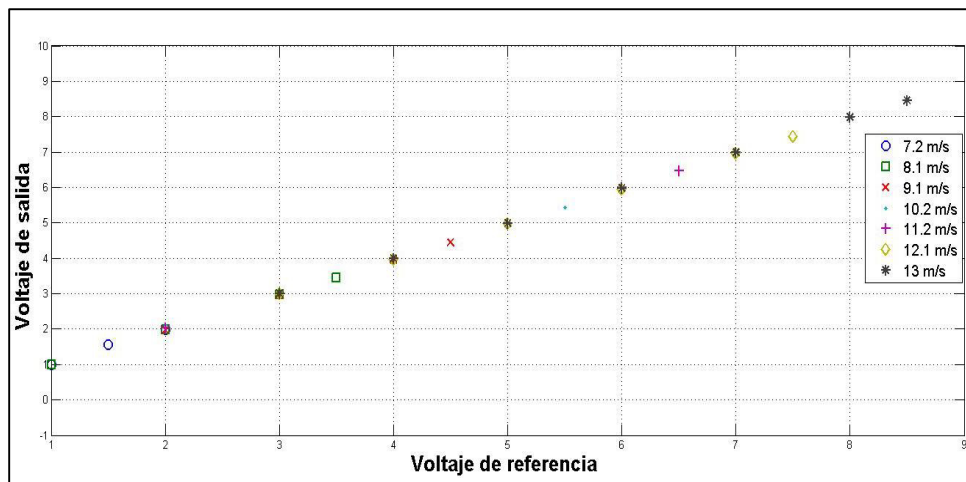


Figura 5.7 Relación voltaje de salida respecto a la referencia a distintas velocidades

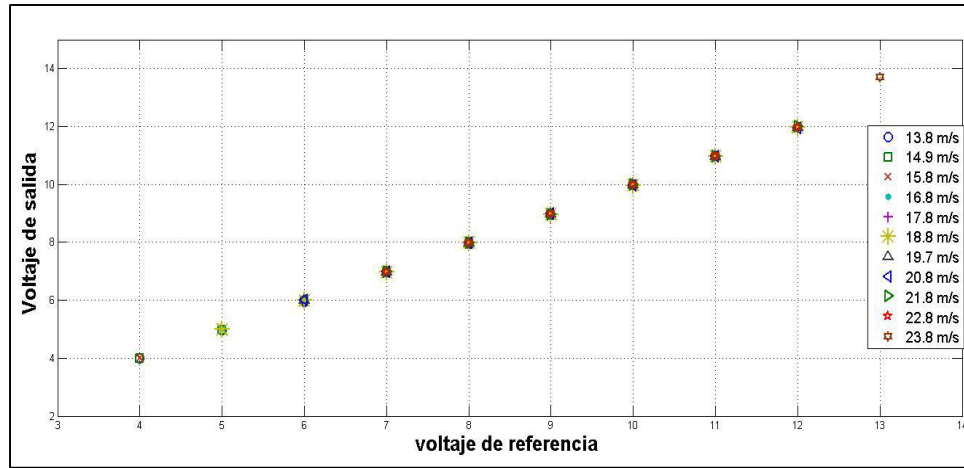


Figura 5.8 Continuación Figura (5.6)

Como es posible observar, que el voltaje que se indica como referencia es prácticamente el voltaje que se obtiene en la salida.

Sin embargo, estos resultados no están exentos de errores. A continuación en las Figuras 5.9 y 5.10 se muestran los porcentajes de error que se alcanzan en cada uno de los niveles de velocidad en el viento.

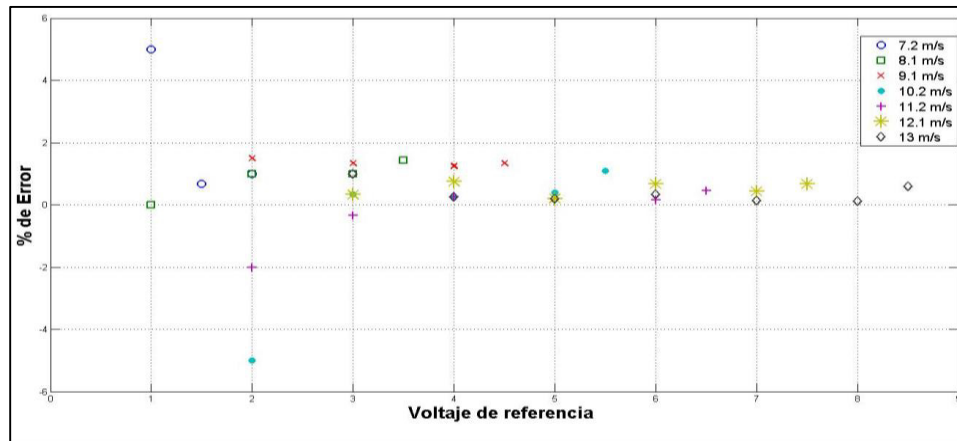


Figura 5.9 Porcentaje de error que alcanzado por el voltaje de salida a diferentes velocidades

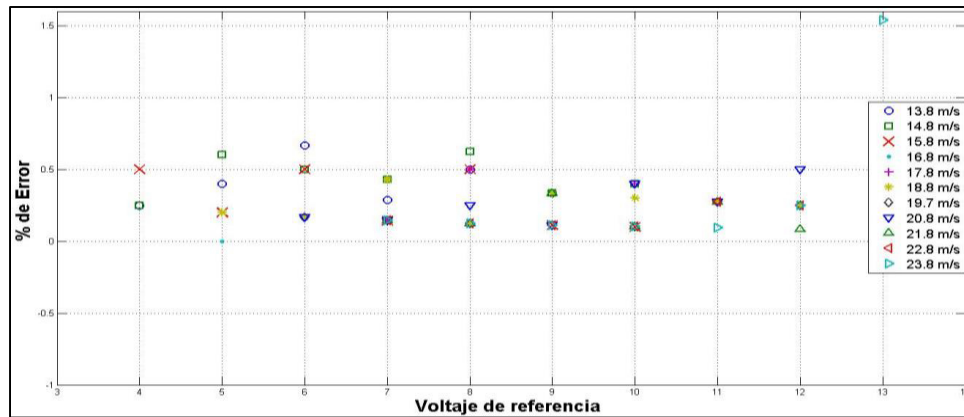


Figura 5.10 Continuación Figura 5.9

En estas Figuras 5.9 y 5.10 es posible observar que el grado de porcentaje de error es relativamente bajo con valores que van del -0.4% al 4% de error.

A continuación en la Tabla 5.4 se muestra los límites de voltaje por ancho de pulso que el sistema puede alcanzar a velocidades que van de los 8m/s a los 23m/s

3936	7.2	8.1	9.1	10.2	11.2	12.1	13	13.8	14.9
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
10%	1	1,33	1,77	2,21	2,7	3,17	3,52	4	4,45
20%	1,17	1,57	2,01	2,56	3,06	3,55	4,02	4,5	5,03
30%	1,37	1,82	2,36	2,98	3,5	4	4,5	5,2	5,77
40%	1,62	2,14	2,76	3,47	4,15	4,72	5,3	5,97	6,6
50%	1,99	2,6	3,26	4,11	4,8	5,5	6,3	7	7,8
60%	2,41	3,15	3,92	4,95	5,7	6,7	7,5	8,5	9,2
70%	2,9	3,77	4,82	5,96	7	8	7,3	7,2	7,7
80%	3,29	4,3	5,6	6,65	6,7	6,5	6,8	6,7	6,7
90%	2,92	3,7	4,7	4,84	5	5,21	5,07	5,3	5,4

Comportamiento del circuito con el generador en túnel (lazo abierto)

15.8	16.8	17.8	18.8	19.7	20.8	21.8	22.8	23.8
m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
4,9	5,33	5,74	6,25	6,6	7,14	7,4	7,8	8,23
5,5	6	6,4	7	7,4	8	8,4	8,6	9,23
6,2	6,9	7,4	8	8,5	9	9,6	10	10,5
7,2	7,9	8,5	9,3	9,8	10,5	11	11,6	12,2
8,6	9,23	10	10,8	11,7	12,21	13	10,8	11,2
10	10,7	8,8	9,4	10,2	10,9	11,5	11,9	10,7
8,5	9,1	9,6	8,7	9	9,6	10,3	10,7	10,9
7,25	7,8	8,4	8,7	8,6	8,9	9,4	9,4	9,7
5,2	6,16	6,6	6,8	7,27	7,7	8,6	8,3	8,7

Tabla 5.4 Limites de voltaje por ancho de pulso

De acuerdo con la Tabla 5.4 se realizan pruebas en el túnel de viento a una velocidad de 13 m/s con el fin de que el generador produzca 3.5V

La primera prueba mostrada en la Figura 5.11 se busca que el voltaje de entrada que en este caso es de 3.5V se incremente a un valor de deseado de 4V este voltaje debe mantenerse constante. Se realizan pruebas de lazo abierto y de lazo cerrado a continuación se muestran los resultados

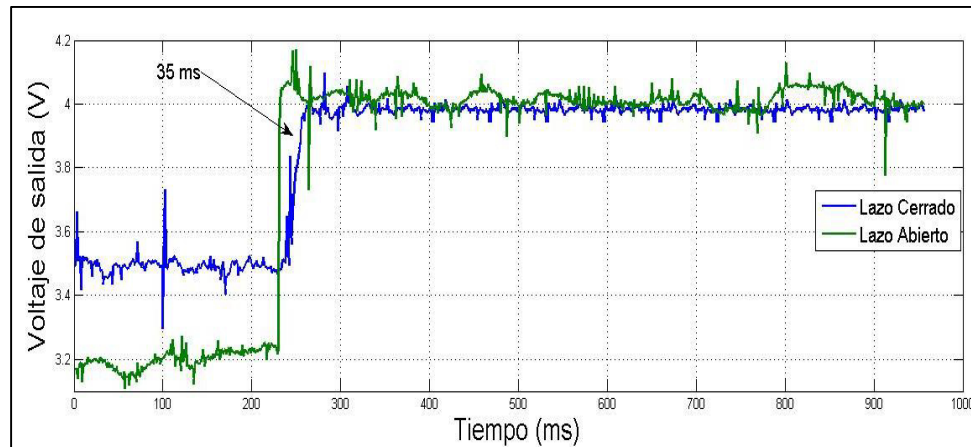


Figura 5.11 Comparación de voltajes de lazo abierto y lazo cerrado a 4V de referencia

En la segunda prueba mostrada en la Figura 5.12 se realiza elevando el voltaje de entrada a hasta un valor de salida de 6V. Obteniendo los siguientes resultados:

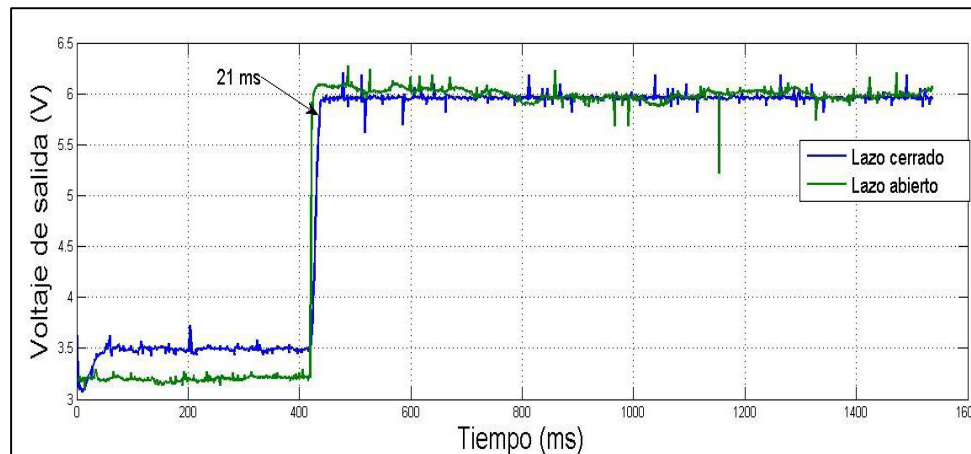


Figura 5.12 Voltajes en lazo abierto y en lazo cerrado a 6V de salida

En la última prueba se busca elevar el voltaje de entrada a 8V en la salida como se muestra en la Figura 5.13.

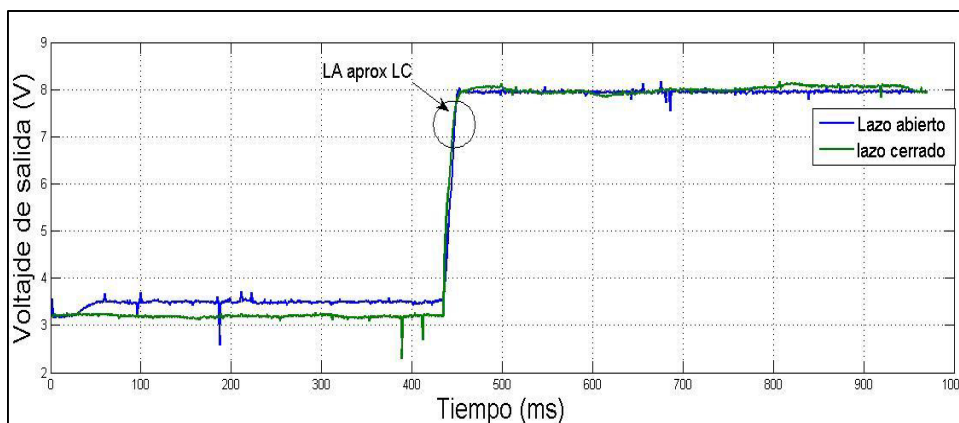


Figura 5.13 Voltajes en lazo abierto y en lazo cerrado a 8V de salida

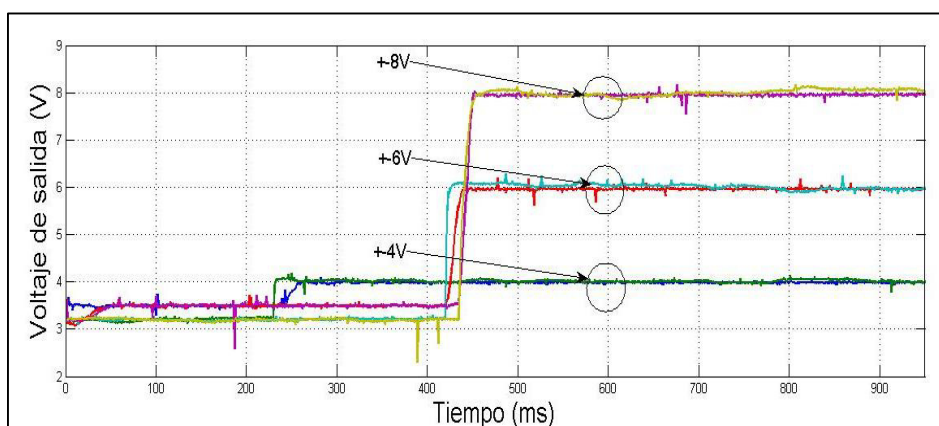


Figura 5.14 comparación de voltajes en lazo abierto y en lazo de las tres pruebas

Como es posible observar en la Figura 5.14 en los resultados de los tres experimentos se nota que tanto la respuesta de lazo cerrado como de lazo abierto es muy parecidas en los tres casos. La ventaja que ofrece el controlador propuesto está en su rechazo a la perturbación. Esta perturbación se aprecia en los pequeños picos debidos a las vibraciones en la estructura en la que se encuentra el generador como se muestra en la Figura 5.4.

Conclusiones parciales

Al finalizar este capítulo se comprueba que el sistema propuesto Figura 5.3, funciona y es capaz de generar electricidad, a través de un generador. También se comprueba, que es posible controlar el voltaje de salida del circuito convertidor elevador de voltaje, llevando este voltaje a un nivel de voltaje de referencia deseado, teniendo bajos porcentajes de error en estado estacionario. También se hacen presentes ciertas consideraciones que se deben tener, al querer implementar este sistema en una aplicación práctica, tales como la velocidad del viento, la corriente que la fuente de voltaje (generador), es capaz de entregar al circuito convertidor elevador. También es importante considerar el nivel de carga al que el circuito estará expuesto.

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Se ha construido un circuito convertidor elevador de voltaje de CD/CD siguiendo el modelo básico descrito en la literatura.

Se ha validado la fórmula que determina el voltaje de salida del circuito convertidor elevador, dándole valores y comparándola con los resultados reales, obteniendo resultados similares en ambos casos.

Se obtuvo un modelo matemático del circuito en base a las ecuaciones características que describen a cada uno de los componentes, utilizando las leyes de mallas y nodos, además se realizaron simulaciones en Matlab© en donde se puede comprobar el funcionamiento del sistema electrónico elevador de voltaje.

Se ha identificado el modelo matemático del circuito mediante experimentación a diferentes niveles de carga y se ha comparado con el modelo matemático teórico. Se determina que un modelo matemático que describe de la mejor manera un circuito convertidor elevador tipo boost siempre será descrito con una ganancia, 1 cero y 2 polos

Se ha diseñado un controlador que es capaz de establecer el voltaje de salida a un valor deseado, con diferentes niveles de carga. El valor de estos niveles está en un rango que va de los 250 a 1000 Ω .

Se ha desarrollado una estructura para pruebas en túnel de viento, además de un programa para realizar mediciones y análisis de datos utilizando el software LabVIEW©. En este programa se pueden realizar pruebas tanto en lazo cerrado como en lazo abierto.

Se ha podido desarrollar un sistema de generación eólica basado en el control de un circuito convertidor elevador de voltaje (Boost), con características adecuadas para su implementación en vehículos aéreos no tripulados de pequeña escala, esto debido a los bajos niveles de voltaje que se manejan.

Este sistema de generación eólica ha probado ser eficiente, ya que mantiene el voltaje indicado como referencia constante en la salida, además este voltaje tiene bajos porcentajes de error. Las pruebas de túnel de viento, simulan condiciones de operación real.

Se han determinado los criterios a considerar para el diseño de sistemas eólicos, cuya finalidad sea ser implementados en vehículos aéreos. Como por ejemplo, se deberá considerar: Las velocidades que el vehículo alcanzará en vuelo, y de acuerdo a la Tabla 5.3 escoger un rango de operación para el circuito.

6.2 RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones esta la implementación y diseño en tarjeta de circuito impreso del controlador Boost, acomodando en una sola tarjeta las etapas de rectificación de voltaje acoplamiento de señal convertidor Boost y controlador

Otra cosa importante es el diseño e implementación del controlador mediante amplificadores operacionales para de esta manera será más fácil establecer un diseño estructural para un futuro ensamblaje en una aeronave.

Otra recomendación importante es la caracterización de diversos tipos de generadores, para determinar cual tiene mejores desempeño de voltaje y corriente. Hacer estas pruebas tanto para motores de CD, CA y sin escobillas y así determinar el mejor se adapte a los requerimientos.

El mejoramiento estructural del programa implementado en LabVIEW© así como el desarrollo de un programa ejecutable que pueda ser instalado en cualquier computadora para futuros experimentos

El diseño aerodinámico de palas de corto tamaño que sean capaces de aprovechar de mejor manera la cantidad de aire que circula a través de las mismas.

REFERENCIAS

- [1] Hansen, Martin O. L. (2015). Aerodynamics of wind turbines / Martin O. L. Hansen. Routledge
- [2] Wei Tong. (2010). Wind power generation and wind turbine design. WIT Press
- [3] <http://aviationcuriosities.blogspot.mx/2012/08/sistemas-del-avion-rat-ram-air-turbine.html>
- [4] P. Bolognesi, F. Papini, L. Taponecco. "Hybrid-Excitation DC Machines as Highly Reliable Generators for Ram Air Turbines". Department of Electric Systems and Automation - University of Pisa Via Diotisalvi 2, 56122 Pisa, Ital.
- [5] http://gco.tel.uva.es/tutorial_cir/tema4/condensa.htm
- [6] Katshuito Ogata, KO, 2010. Ingeniería de control moderna, 5ta edición Madrid España, Pearson education.
- [7] Muhammad H.Rashid, MHD, 2004, Electrónica de Potencia Circuitos dispositivos y aplicaciones, Tercera edición.
- [8] Mohan Underland Robbins, MUR, 2003, Power Electronic Converter applications and desing, United Estates of America John Wiley & Son, INC
- [9] Freddy Fernando Valderrama, Henry Moreno C, Héctor Manuel Vega. "Análisis, Simulación y de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost" 2011
- [10] Nguyen Van Sang and Woojin Choi "A non-isolated Boost Charger for Li-Ion Battery Suitable for Fuel Cell Powered Laptop Computer" Power Electronics and Motion Control Conference – ECCE Asia. 2012 IEEE 7th.
- [11] System Identification Toolbox™ User's Guide Pg.1-17 © COPYRIGHT 1988–2014 by The MathWorks, Inc.

APÉNDICE

1. - PWM ARDUINO.

```
int ledPin = 11;    // LED connected to digital pin 9
int analogPin = 1;  // potentiometer connected to analog pin 3
int val = 0;        // variable to store the read value

void setup()
{
  TCCR2B = 2
  ; // Cambia el valor de la frecuencia de operación del Arduino
  // 1=31360Hz, 2=39360Hz, 3=984Hz, 4=490Hz
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // sets the pin as output
}

void loop()
{
  val = analogRead(analogPin); // read the input pin
  analogWrite(ledPin, val / 4); // analogRead values go from 0 to 1023, analogWrite values
  from 0 to 255
}
```

DATOS DE ARDUINO

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

2.- CÓDIGO MATLAB DEL MODELO MATEMÁTICO

```

clc
1  %Valores
2  r=.6; %Resistencia de la bobina
3  R=1000; %Resistencia de carga
4  L=110e-3; %Inductancia
5  C=1000e-6; %Capacitancia
6  U=.5;
7  %U= (1-D); %Ciclo de trabajo
8
9  E=6; %Punto de operación de corriente
10 Ia=-E/-250.6;
11 V= -U*Ia*-R;
12 % Valores de las matriz
13
14 a11 = -r/L;
15 a12 = -U/L;
16 a21 = U/C;
17 a22 = -1/(R*C);
18 b11 = V/L; % se cambió el valor de -V/L a V/L por el
    análisis de mallas de Kirchhoff
19 b21 = Ia/C;
20 % matrices
21 A=[a11,a12;a21,a22];
22 B=[b11;b21];
23 C=[1,0;0,1];
24 D=[0 0];
25
26 s= tf('s');
27 I= eye(2);
28 SI= s*I;
29 SImA= SI-A;
30 InSImA =inv(SImA);
31 num=[500,3228,1.139e6];
32 den=[.0004788,25.03,54550,0];
33 num2=[0,32,1.139e6];
34 den2=[0,25,54550,0];
35 CL=tf(num,den);
36 CL2=tf(num2,den2);
37 GS=C*InSImA*B;
38 GS1=minreal(GS);
39 GSI=GS1(1,1);
40 GSV=GS1(2,1);
41 CL3 = 4.5/(s+10);
42 CL4 = (2*s+12)/(s^2+12*s)

```

3.- CODIGO MATLAB MODELOS IDENTIFICADOS

```

clc
s= tf('s');
num1=[.7429,.0007828];
den1=[1,.08162,1.567e-5];
GV1=tf(num1,den1); %% 1Kohm
num2=[1.04,.001872];
den2=[1,.1626,4.444e-5];
GV2=tf(num2,den2); %% 500ohm
num3=[1.191,.00261];
den3=[1,.2253,7.654e-5];
GV3=tf(num3,den3); %% 333ohm
num4=[1.407,.003082];
den4=[1,.1328,.0001077];
GV4=tf(num4,den4); %% 250ohm

f1=feedback(GV1,1);
f2=feedback(GV2,1);
f3=feedback(GV3,1);
f4=feedback(GV4,1);

% Diagramas de bode OL
figure(1)
bode(GV1,GV2,GV3,GV4);
figure(2)
step(f1,f2,f3,f4);
% Controlador C1
gaindb=10;
k=10^(gaindb/20);

C1=(s+5)/(s+5.19e-2)*k;

GC1=GV1*C1;
GC2=GV2*C1;
GC3=GV3*C1;
GC4=GV4*C1;

% Bode sistema*Contrlador
figure(3)
bode(GC1,GC2,GC3,GC4);
% Lazo cerrado
fc1=feedback(GC1,1);
fc2=feedback(GC2,1);
fc3=feedback(GC3,1);
fc4=feedback(GC4,1);

figure(4)
step(fc1,fc2,fc3,fc4);
%% Diseño del controlador del Mestro
Daniel Martinez
figure(5)
rlocus(GV1,GV2,GV3,GV4);
zpk(GV1);
zpk(GV2);
zpk(GV3);
zpk(GV4);
%Contrlador
C2 = 100/(s+10);
O1_1 = C2*GV1;

O1_2 = C2*GV2;
O1_3 = C2*GV3;
O1_4 = C2*GV4;
% bode & rootlocus Lazo abierto
figure(6)
bode(O1_1,O1_2,O1_3,O1_4);
figure(7)
rlocus(O1_1,O1_2,O1_3,O1_4)
% lazo cerrado
C11 = feedback(O1_1,1);
C12 = feedback(O1_2,1);
C13 = feedback(O1_3,1);
C14 = feedback(O1_4,1);

figure(8)
step(C11,C12,C13,C14);

%%
C3 = 210*(s+0.5)/(s*(s+15));

O11_2 = GV1*C3;
O12_2 = GV2*C3;
O13_2 = GV3*C3;
O14_2 = GV4*C3;

figure(9)
bode(O11_2,O12_2,O13_2,O14_2);

C11_2 = feedback(O11_2,1);
C12_2 = feedback(O12_2,1);
C13_2 = feedback(O13_2,1);
C14_2 = feedback(O14_2,1);

figure(10)
step(C11_2,C12_2,C13_2,C14_2)

C4 = 100*(s+0.3)/(s*(s+10));

O11_3 = GV1*C4;
O12_3 = GV2*C4;
O13_3 = GV3*C4;
O14_3 = GV4*C4;

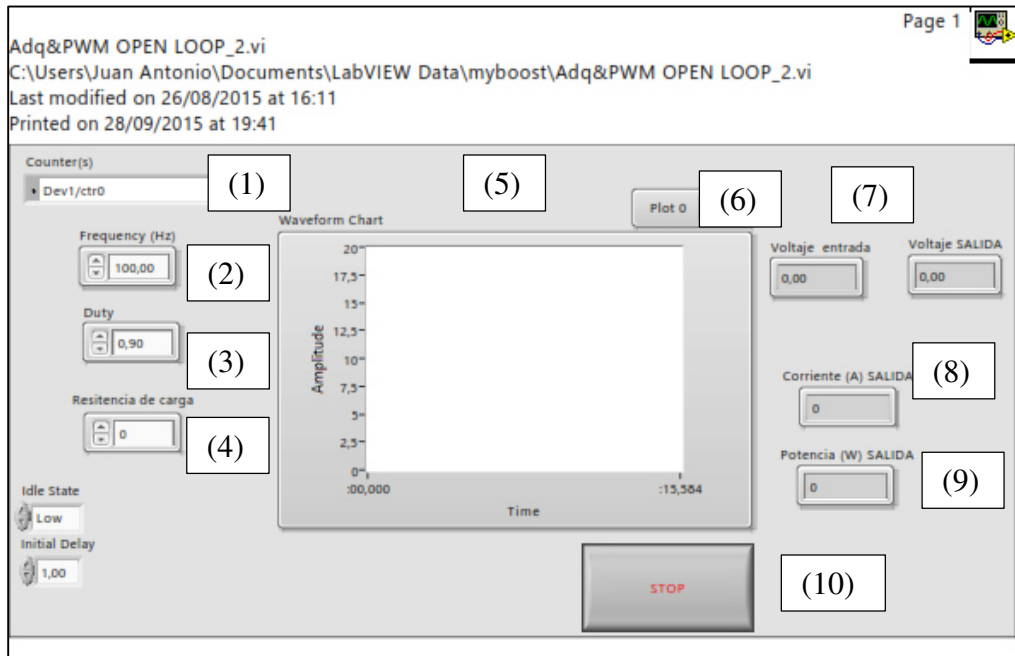
figure(11)
bode(O11_3,O12_3,O13_3,O14_3);

%%
C11_3 = feedback(O11_3,1)
C12_3 = feedback(O12_3,1)
C13_3 = feedback(O13_3,1)
C14_3 = feedback(O14_3,1)

figure(12)
step(C11_3,C12_3,C13_3,C14_3)

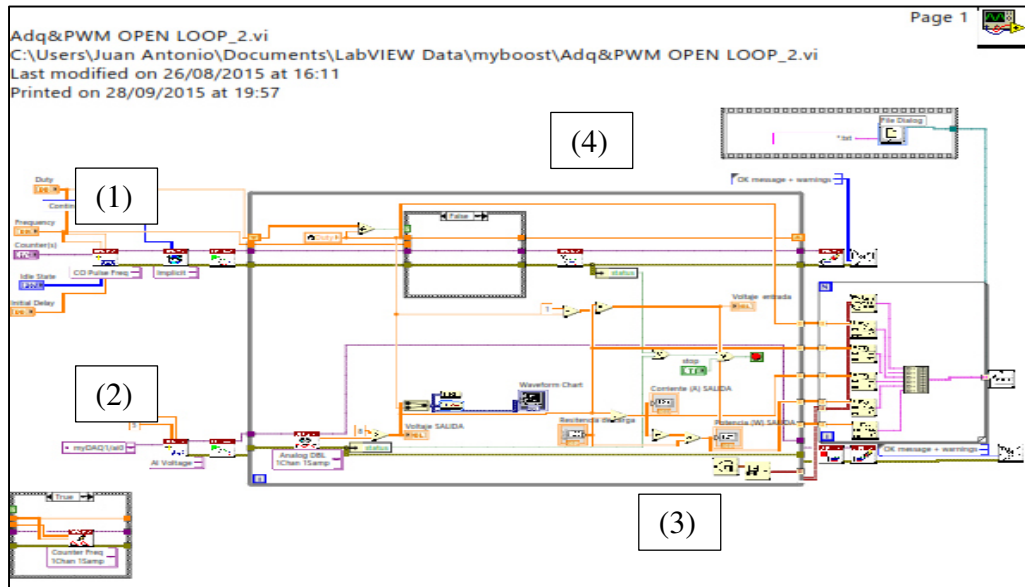
```

4.- VI LABVIEW LAZO ABIERTO

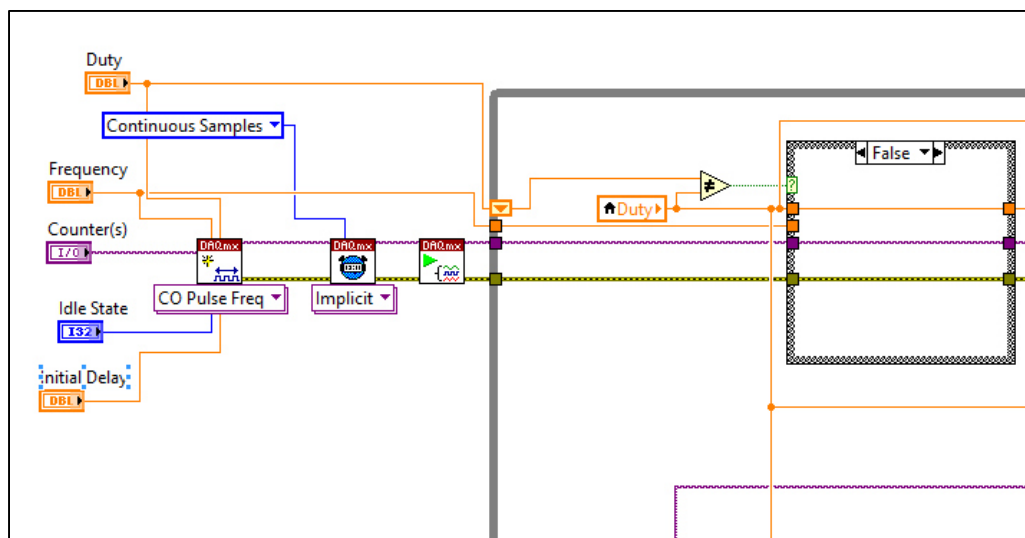


1. - Selección de dispositivo.
- 2.- Selección de frecuencia de onda.
- 3.- Ciclo de trabajo deseado.
- 4.- Resistencia de carga.
- 5.- Gráfica de voltaje obtenido en la salida.
- 6.- Contador de voltaje en la entrada.
- 7.- Contador de voltaje en la salida.
8. - Corriente de salida
9. - Potencia de salida.
10. - Paro del programa.

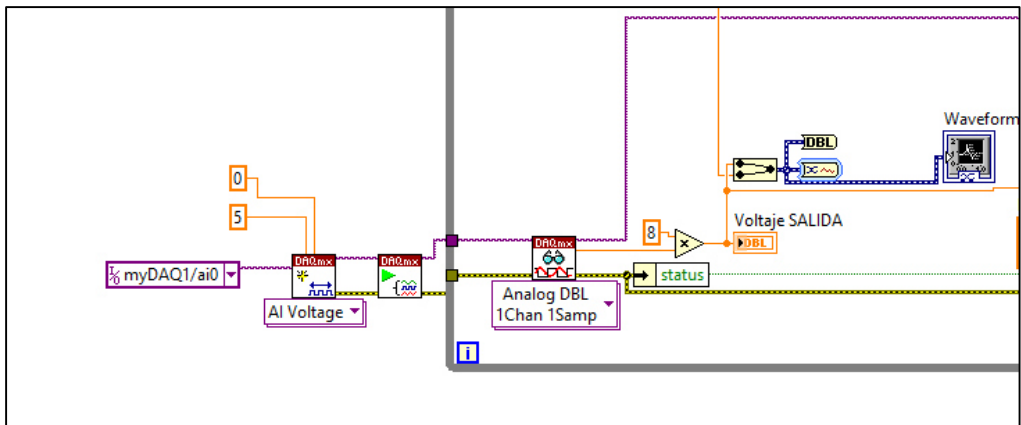
5.- CODIGO LABVIEW LAZO ABIERTO



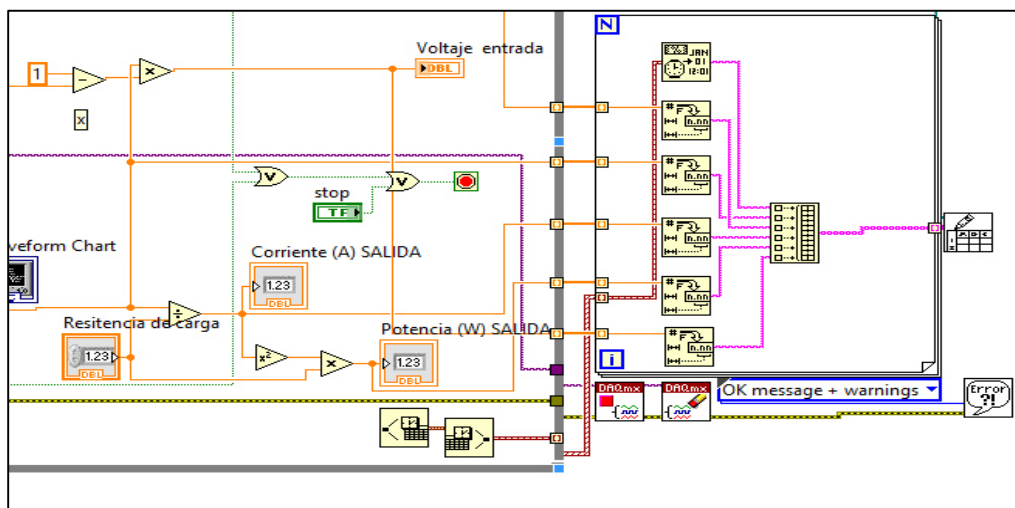
1.- Bloques designados para la generación de un PWM



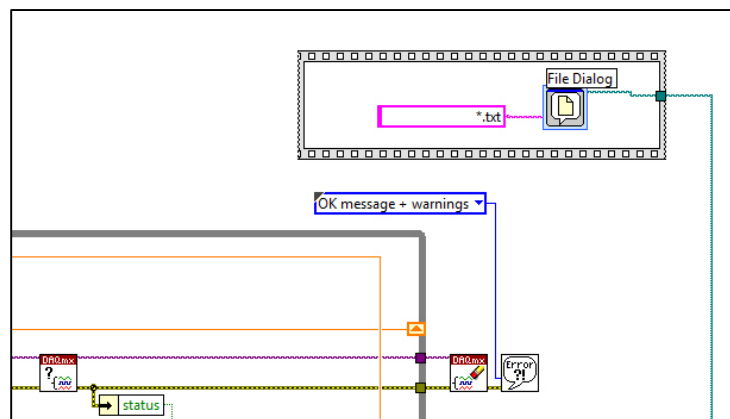
2.- Bloques designados para la lectura de voltaje a través de una entrada analógica.



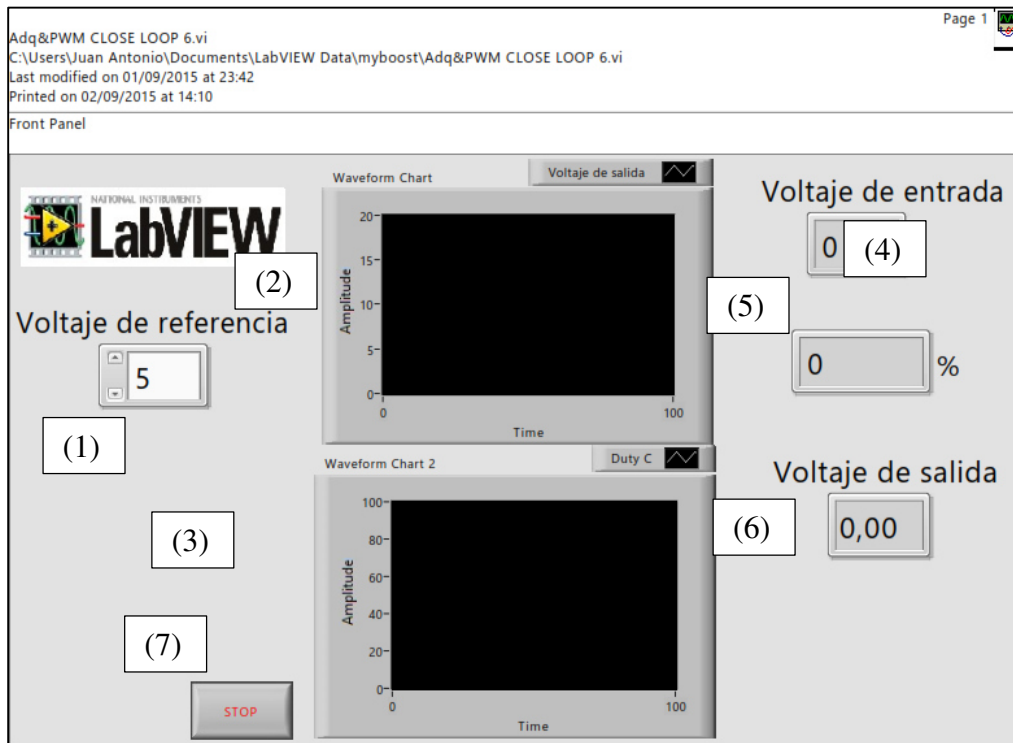
3.- De lado izquierdo se tienen algunas operaciones matemáticas para el cálculo del voltaje de entrada, corriente y potencia de salida y de lado derecho tenemos un arreglo para la captura de los datos obtenidos en un archivo .txt.



4.- Continuación de las etapas 1 y 3

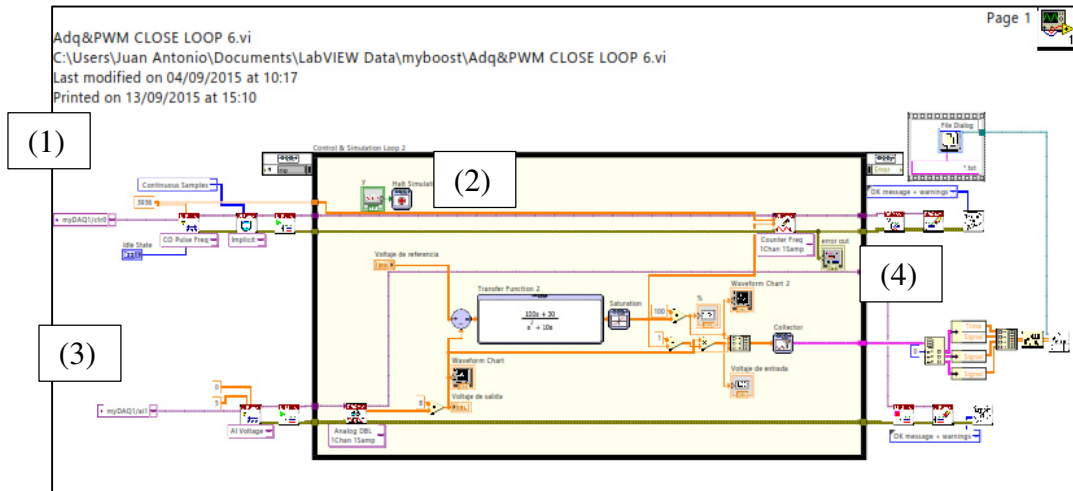


6.- VI LABVIEW LAZO CERRADO

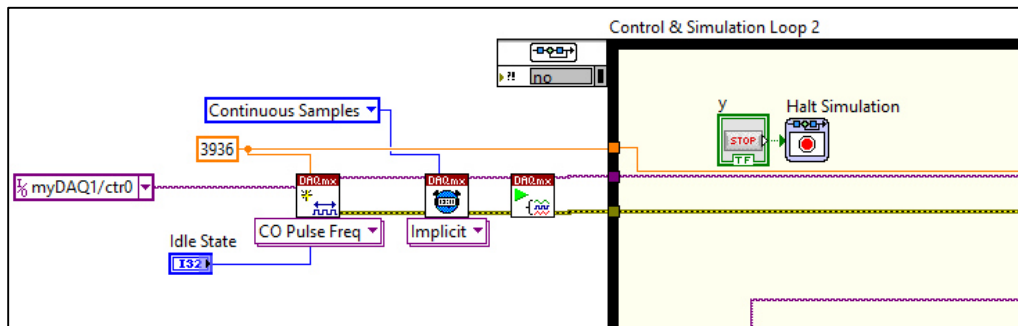


- 1.- Se establece un voltaje de referencia.
- 2.- Gráfica de voltaje de salida
- 3.-Gráfica de ancho de pulso o ciclo de trabajo
- 4.-Medidor de voltaje en la entrada
- 5.-Medidor de porcentaje de ancho de pulso
- 6.- Medidor de voltaje de salida.
- 7.- Paro del programa

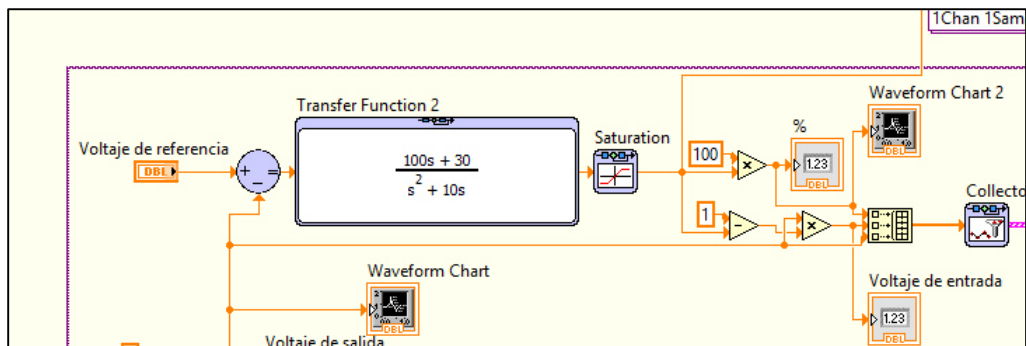
7.- CÓDIGO LABVIEW LAZO CERRADO



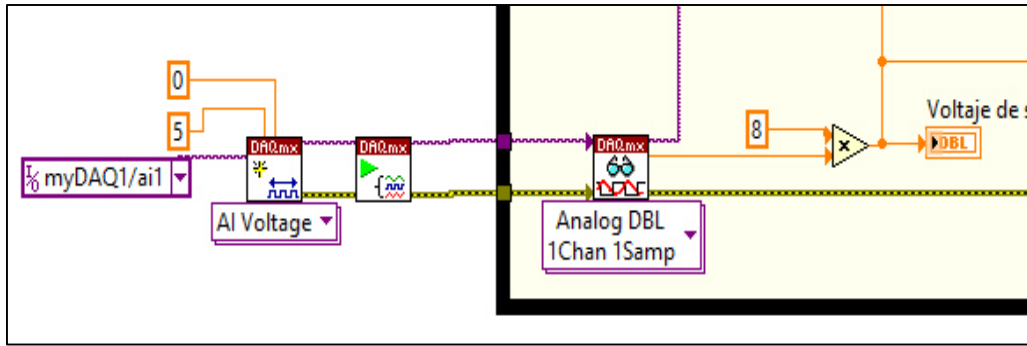
1.- Bloques que en los que se asignan las características del PWM



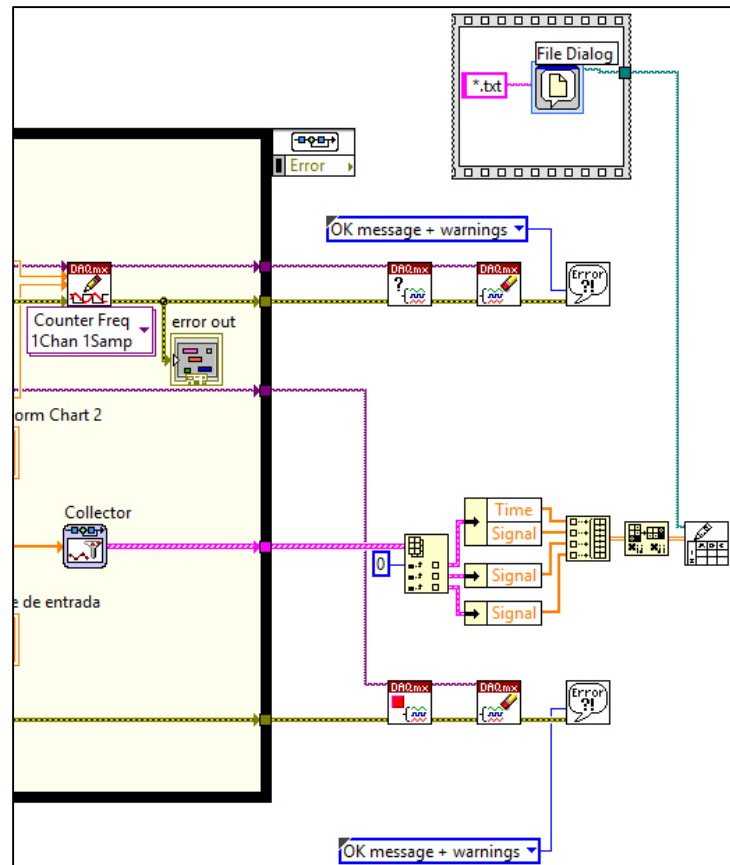
2.- Lazo de control cuya salida es un valor de .1 a .9



3.- Bloques designados para la lectura de voltaje a través de una entrada analógica.



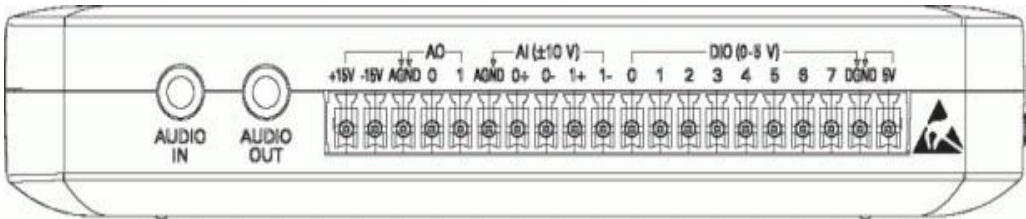
4.- Arreglo de captura de datos en un archivo .txt



8.-DATOS DE LOS PUERTOS DEL NI myDAQ

NI myDAQ

I/O Connectors

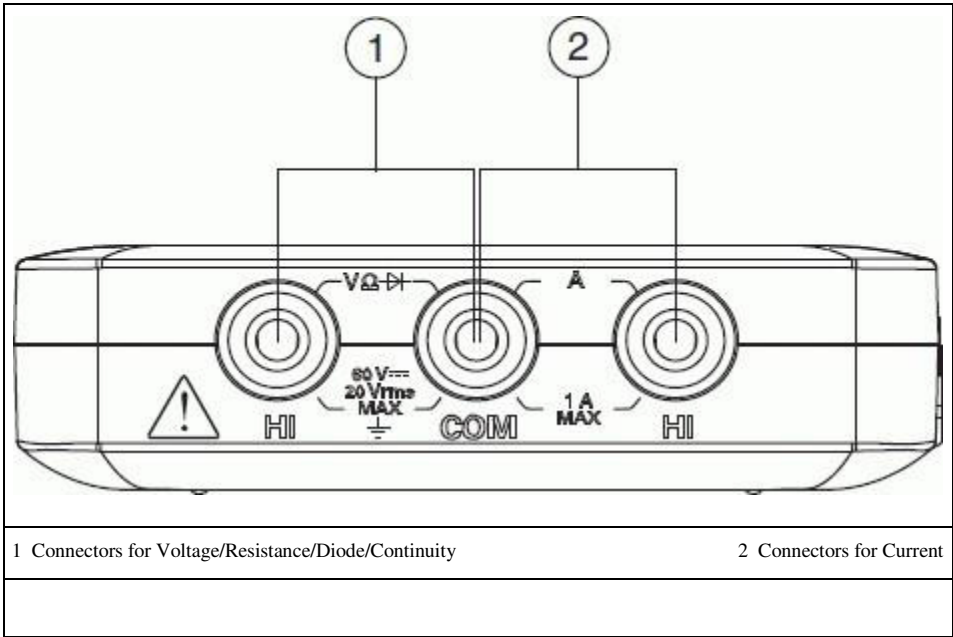


Note DIO pins can also be used as PFI pins.

NI myDAQ Counter/Timer Signal Assignments

NI myDAQ Signal	Programmable Function Interface (PFI)	Counter/Timer Signal	Quadrature Encoder Signal
DIO 0	PFI 0	CTR 0 SOURCE	A
DIO 1	PFI 1	CTR 0 GATE	Z
DIO 2	PFI 2	CTR 0 AUX	B
DIO 3*	PFI 3	CTR 0 OUT	—
DIO 4	PFI 4	FREQ OUT	—
* Pulse-width modulation (PWM) pulse train measurements are generated through DIO 3			

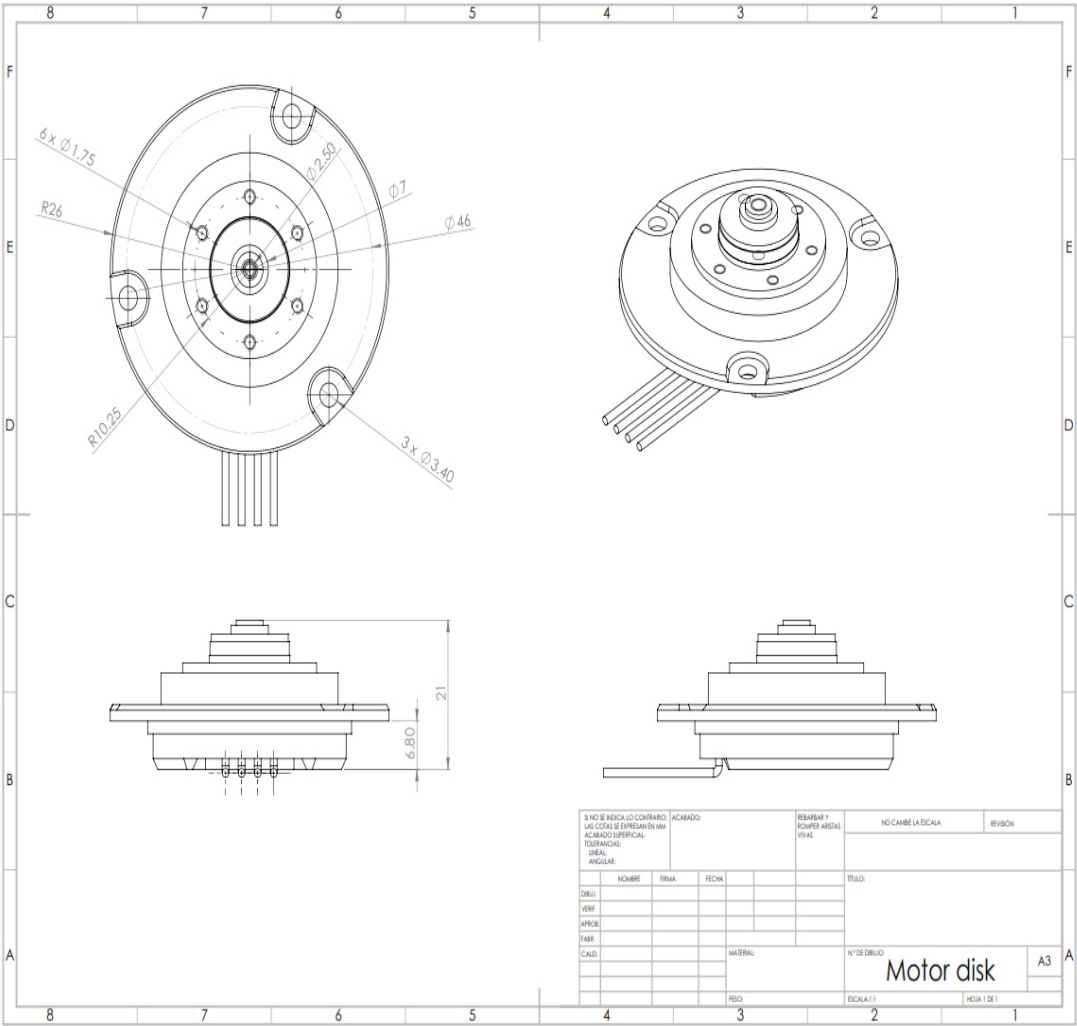
Connections for DMM Measurements



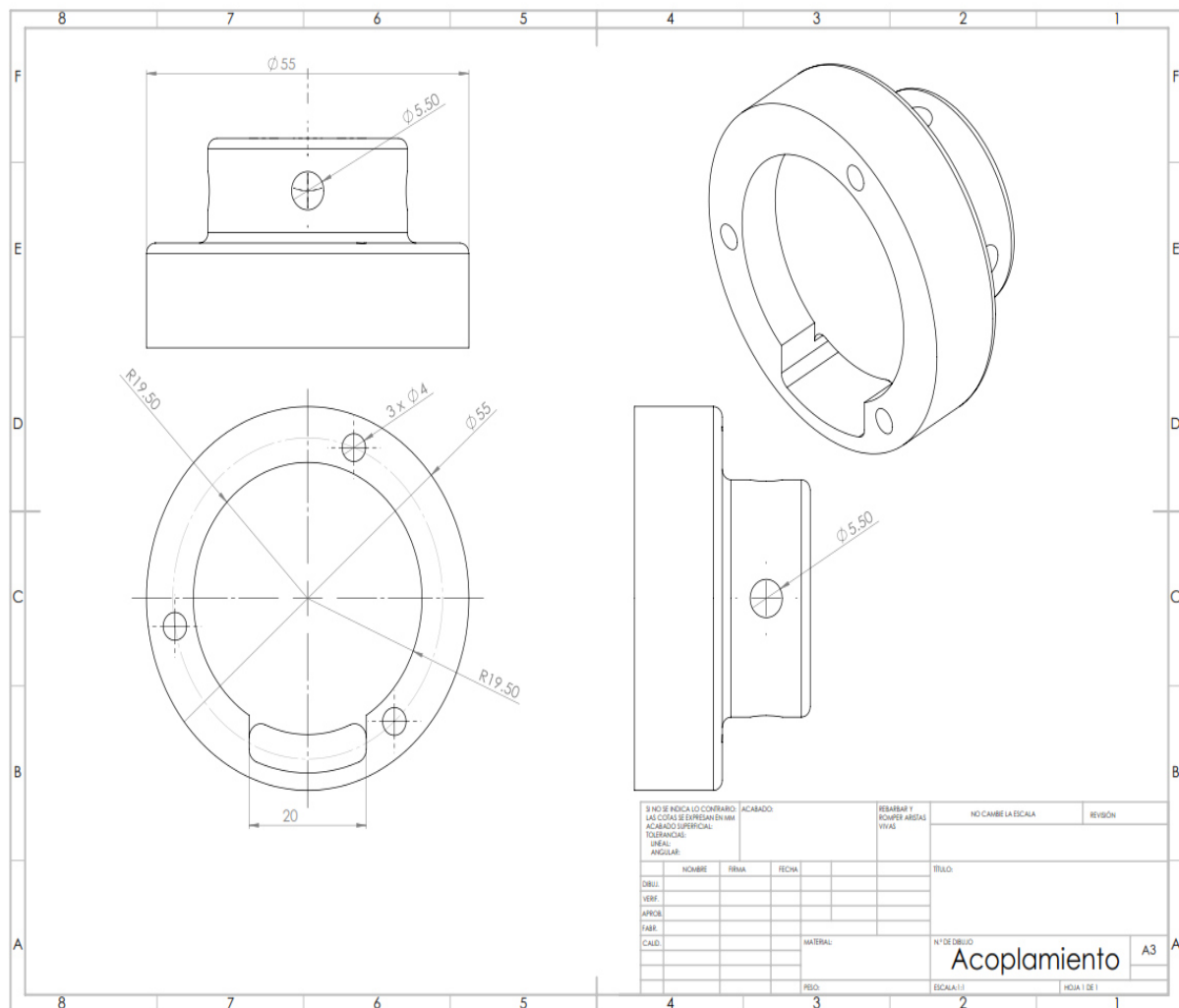
1 Connectors for Voltage/Resistance/Diode/Continuity

2 Connectors for Current

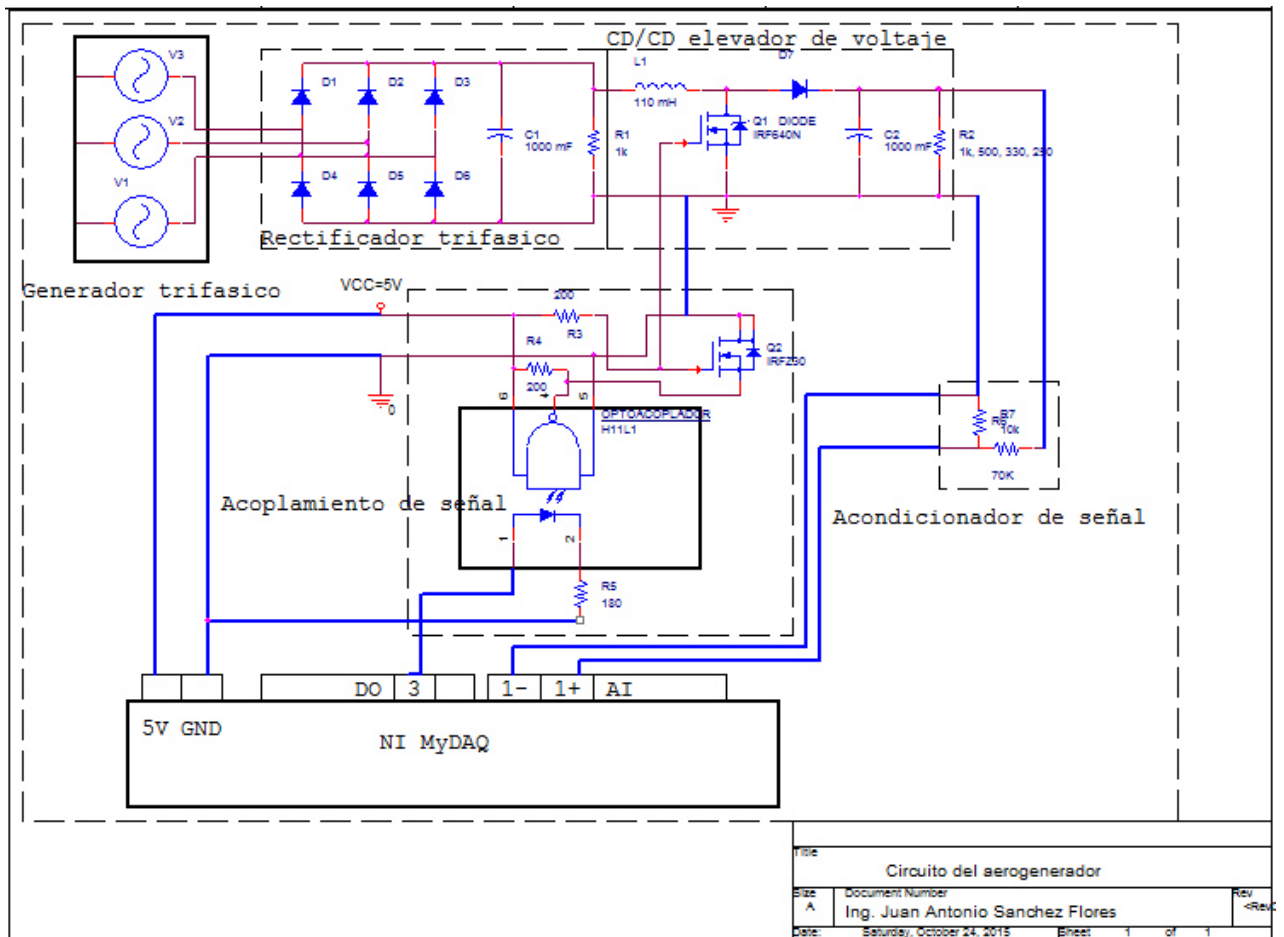
9.-CAD DEL GENERADOR



10.- CAD ACOPLAMIENTO DEL GENARADOR



11.-DIAGRAMA DEL SISTEMA



AUTOBIOGRAFÍA

Nací en la ciudad de Monterrey Nuevo León el 25 de junio de 1989, hijo de Juan Antonio Sánchez Briones y Delia Flores Salazar, he realizado todos mis estudios en el estado de Nuevo León. La educación primaria la recibí en la escuela “Prof. Lauro Aguirre Espinoza, ubicada en la colonia Rincón de la Sierra en Guadalupe Nuevo León. Concluida mi educación primaria, ingrese a la escuela Secundaria General “Prof. Manuel Rodríguez Vázquez” ubicada en la colonia Tres Caminos en Guadalupe N.L. Esta escuela imparte materias de especialidad técnica, en mi caso particular lleve la materia de “Dibujo técnico”. Una vez concluida la educación secundaria ingrese a la “Escuela Industrial y Preparatoria Técnica Álvaro Obregón” cursando la carrera de Técnico en Electrónica Industrial. Al terminar mis estudios de preparatoria, no ingresé de inmediato a la facultad. Durante el periodo (2007 al 2008), tuve la oportunidad de ejercer como técnico en el electrónica en dos empresas.

Después de este tiempo decidí entrar a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, impulsado en gran parte por lo aprendido durante el periodo como técnico. En esta facultad curse la carrera de Ingeniero en Electrónica y Automatización. Concluyendo mis estudios de ingeniería en el año 2013. Inmediatamente después comencé los estudios de posgrado en el Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA) de la misma Facultad, la carrera de Maestría en ciencias de la ingeniería aeronáutica con especialidad en dinámica de vuelo.